



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Técnica Industrial Mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS
PARAMETROS DE CONTACTO EN ADAMS:
APLICACION A UN MODELO RESTRINGIDO
DEL BIPEDO PASIBOT**

Autor:

JUAN JOSÉ TIRADO RUIZ

Director:

HIGINIO RUBIO ALONSO

Leganés, julio de 2012

ÍNDICE DEL DOCUMENTO

Capítulo 1: MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	1
1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO.....	2
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	5
FASES DEL PROYECTO.....	6
1.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	8
Capítulo 2: INTRODUCCIÓN.....	10
2.1. INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA	11
2.1.1 CONCEPTO DE ROBÓTICA.....	11
2.1.2. HISTORIA DE LA ROBÓTICA	11
2.1.3. HISTORIA DE LAS LEYES DE LA ROBÓTICA	12
2.1.4 LA PREHISTORIA	15
2.1.5 DESARROLLO HISTÓRICO.....	15
2.1.5.1 EL HOMBRE DE PALO	16
2.1.5.2 EL PATO CON APARATO DIGESTIVO	17
2.1.5.3. LA MUÑECA ESCRIBANA.....	17
2.1.5.4. PRIMERAS APROXIMACIONES	18
2.1.6. UNA INDUSTRIA NOVEDOSA	19
2.2. DEFINICIÓN DE ROBOT	20
2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS.....	22
2.3.1 CLASIFICACIÓN POR GENERACIONES	22
2.3.2 CLASIFICACIÓN SEGÚN SU ARQUITECTURA	23
2.4. FUNDAMENTOS DE LA MARCHA BÍPEDA	27
2.5. HISTORIA DE LOS ROBOTS BÍPEDOS.....	28
2.5.1 ROBOTS BÍPEDOS PASIVOS.....	29
2.5.2 ROBOTS BÍPEDOS ACTIVOS	33
Capítulo 3: DISEÑO DEL PASIBOT	50
3.1. DISEÑO DEL PASIBOT	51
3.1.1 MECANISMO DE CHEBYSHEV O HOEKENS	52
3.1.2 MECANISMO DE PANTÓGRAFO	53
Capítulo 4: MANUAL DE APRENDIZAJE DE MSC ADAMS.....	55
4.1. INTRODUCCIÓN	56

4.2. CONTROLES BÁSICOS	57
4.3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	59
4.3.1. DISEÑO DE SÓLIDOS	65
4.3.2. OPERACIONES BOOLEANAS.....	66
4.3.3. MODIFICACIÓN DE SÓLIDOS	67
4.3.4. MODIFICACIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES INICIALES DE LOS SÓLIDOS.....	68
4.3.5. POSICIÓN	68
4.3.6. DIMENSIONES.....	70
4.3.7. DISEÑO DE JUNTAS, ACTUADORES Y FUERZAS	71
4.3.7.1. JUNTAS	71
4.3.7.2. ACTUADORES	75
4.3.7.3. FUERZAS	78
4.4. SIMULACIÓN DEL MODELO	80
4.5. ANIMACIÓN DEL MODELO	81
4.6. TOMA DE MEDIDAS	82
4.7. POSTPROCESADOR	83
4.8 IMPLEMENTACIÓN DE FRICCIÓN EN LAS JUNTAS	87
4.8.1 PARÁMETROS EN JUNTAS DE REVOLUCIÓN	90
4.8.2 PARÁMETROS EN JUNTAS DE TRASLACIÓN	93
4.9 IMPLEMENTACIÓN DE LAS FUERZAS DE CONTACTO ENTRE EL ROBOT Y EL SUELO	97
4.9.1 DEFINIR EL TIPO Y GEOMETRÍA DEL CONTACTO	98
4.9.2 PERFECCIONAR LA FUERZA NORMAL ENTRE DOS CONJUNTOS	99
4.9.3 PARÁMETROS A TENER EN CUENTA EN UN CONTACTO BASADO EN RESTITUCIÓN .	99
4.9.4 PARÁMETROS A TENER EN CUENTA EN UN CONTACTO BASADO EN IMPACTO	102
4.9.5 MODELADO DE LOS EFECTOS DE LA FRICCIÓN EN LOS PUNTOS DE CONTACTO CON EL MÓDULO DE FRICCIÓN DE COULOMB	103
4.9.6 MODELADO DE LOS EFECTOS DE LA FRICCIÓN EN LOS PUNTOS DE CONTACTO CON SU PROPIO MODELO	104
Capítulo 5: MODELO TEÓRICO Y ESTUDIO DE FRICCIÓN EN MSC ADAMS.....	106
5.1. MODELO TEORICO.....	107
5.2. EVOLUCION DE DISEÑO Y ESTRUCTURA DEL PASIBOT.....	108
5.2.1 DISEÑO INICIAL MODELO ANALITICO Y BASE.....	108
5.2.2 DISEÑO MODIFICADO.....	109
5.2.3. DESCRIPCIÓN DEL MECANISMO DE LA PIERNA.....	110

5.2.3.1. MECANISMO DE LINEA RECTA DE CHEBYSHEV	110
5.2.3.2. PANTOGRAFO:.....	111
5.2.3.3 ACCIÓN CONJUNTA DE AMBOS MECANISMOS.....	112º
5.3. IMPLEMENTACION DEL DISEÑO MODIFICADO EN MSC. ADAMS.	113
5.3.1 MODELO FIBRILAR.....	113
5.3.2 MODELO GAMBA.	116
5.3.3 MODELO PASIBOT	121
5.3.3.1 ELEMENTOS COMUNES.....	121
5.3.3.2 ELEMENTOS DE UNIÓN Y SUJECIÓN.....	124
5.3.3.3 ELEMENTOS MOTRICES Y SISTEMA DE TRANSMISIÓN	125
5.3.3.4 MODELO SIMPLIFICADO PARA MSC ADAMS.....	126
5.4 ESTUDIO DE CONTACTO EN MSC ADAMS.....	138
5.4.1 COMPORTAMIENTO DE LA BOLA CONTACTO TIPO “IMPACT”	139
5.4.2 COMPORTAMIENTO DE LA BOLA CONTACTO TIPO “RESTITUTION”	139
5.5 ESTUDIO DE FRICCIÓN EN MSC ADAMS.....	143
Capítulo 6: ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	153
6.1. ESTUDIO DE FRICCIÓN EN MODELO SIMPLIFICADO	154
6.1.1 ANALISIS Y RESULTADOS: PASIBOT COLGADO	154
6.1.1.1 ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL MODELO.....	154
6.1.1.2 ANÁLISIS DINÁMICO.....	162
6.1.1.2.1 ANÁLISIS SIN FRICCIÓN.....	162
6.1.1.2.2 ANÁLISIS CON FRICCIÓN EN LAS JUNTAS ROTACIONALES	166
6.1.1.2.3 ANÁLISIS CON FRICCIÓN EN LAS JUNTAS TRASLACIONALES.....	185
6.1.1.2.4 ANÁLISIS CON FRICCIÓN EN LAS JUNTAS ROTACIONALES Y TRASLACIONALES	200
Capítulo 7: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	204
7.1 CONCLUSIONES	205
7.2 FUTUROS DESARROLLOS	209
Capítulo 8: BIBLIOGRAFÍA.....	211
Capítulo 9: PRESUPUESTO	215
ANEXOS	218
ANEXO I	219
ANEXO II	254

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Robot Pasibot	3
Figura 1.2: Robot Rh-0	3
Figura 1.3: Robot 1	3
Figura 1.4: Robots en una cadena de montaje automóviles	4
Figura 2.1: El hombre Bicentenario	14
Figura 2.2: Autómata del pato con aparadigestivo	17
Figura 2.3: El escritor, de Jaquet-Droz	18
Figura 2.4: Robot Unimate de Devol	20
Figura 2.5: Robot poliarticulado de paletización de cargas unitarias	24
Figura 2.6: Robot bípedo Asimo	25
Figura 2.7: Robot zoomórfico Spirit	25
Figura 2.8: Ciclo de la marcha	27
Figura 2.9: Wilson Walkie	29
Figura 2.10: Robot bípedo pasivo de Wisse y Ruina	30
Figura 2.11: Robot Ranger	31
Figura 2.12: Robot Toddler del MIT	32
Figura 2.13: Robot Denise	33
Figura 2.14: Robot ELEKTRO	34
Figura 2.15: WABOT-1	35
Figura 2.16: WABOT-2	35
Figura 2.17: E0	36
Figura 2.18: E1, E2, E3	36
Figura 2.19: Shadow Walker	37
Figura 2.20: E4, E5, E6	38
Figura 2.21: P1, P2, P3	39
Figura 2.22: Hadaly	40
Figura 2.23: HRP-1S	40
Figura 2.24: SDR-3X	41
Figura 2.25: ASIMO	41
Figura 2.26: H6	43
Figura 2.27: SDR-4X	43
Figura 2.28: HEP-2P	44
Figura 2.29: HRP-2	44
Figura 2.30: QRIO	45
Figura 2.31: Partner	46

Figura 2.32: Rh-1	46
Figura 2.33: MechaDroid Type C3	47
Figura 2.34: NIT Humanoide	48
Figura 3.1: Modelo Pasibot	51
Figura 3.2: Mecanismo de Chebyshev o Hoekens	52
Figura 3.3: Mecanismo de Pantógrafo	53
Figura 3.4: Trayectorias de Chebyshev y Pantógrafo	54
Figura 4.1: Menú de inicio	56
Figura 4.2: Espacio de trabajo y barra de tareas	57
Figura 4.3: Barra de tareas	58
Figura 4.4: Barra de tareas de diseño	59
Figura 4.5: Menú de diseño	59
Figura 4.6: Editor de Puntos “Point Table	59
Figura 4.7: Punto añadido al suelo “Ground”	60
Figura 4.8: MARKERS	62
Figura 4.9: Cuadro de diálogo de MARKERS	63
Figura 4.10: Tipos de líneas	65
Figura 4.11: Modificación de dimensiones	68
Figura 4.12: Posición de	69
Figura 4.13: Modificación de dimensiones	70
Figura 4.14: Diseño de Juntas	71
Figura 4.15: Selección de Elementos	72
Figura 4.16: Menú de modificación de juntas	73
Figura 4.17: Menú de movimientos de precisión de juntas	73
Figura 4.18: Definición de juntas	74
Figura 4.19: Cuadro de Diálogo de actuadores	76
Figura 4.20: Menú de Juntas	76
Figura 4.21: Constructor de funciones	77
Figura 4.22: Menú de Fuerzas	78
Figura 4.23: Menú de Contactos	79
Figura 4.24: Menú de simulación	80
Figura 4.25: Menú de Animación	81
Figura 4.26: Barra de herramientas de medidas	82
Figura 4.27: Medidas	82
Figura 4.28: Medidas de elementos	83
Figura 4.29: Paso de medidas al POSTPROCESADOR	84
Figura 4.30: Postprocesador	84
Figura 4.31: Exportación de datos y archivos	85
Figura 4.32: Carga y visualización de animaciones en el Postprocesador	86

Figura 4.33: Implementación de fricción en la junta	87
Figura 4.34: Opciones al entrar en la junta	88
Figura 4.35: Parámetros a definir en una junta de revolución	88
Figura 4.36: Parámetros a definir en una junta de traslación	89
Figura 4.37: Barra de herramientas principal	97
Figura 4.38: Opciones de contacto	98
Figura 5.1: Diseño Básico Final	109
Figura 5.2: Mecanismo Chebyshev	110
Figura 5.3: Notación del Chebyshev	110
Figura 5.4: Notación del Pantógrafo	111
Figura 5.5: Notación utilizada y trayectorias	112
Figura 5.6: Modelo FIBRILAR implementado en Working Models y en MSC.ADAMS	113
Figura 5.7: Modelo FIBRILAR	115
Figura 5.8: Modelo de PASIBOT en SolidWorks	117
Figura 5.9: Modelo de PASIBOT. Vista lateral	118
Figura 5.10: Modelo GAMBA en Working Models	118
Figura 5.11: Modelo GAMBA implementado en MSC.ADAMS	120
Figura 5.12: Modelo simplificado para Adams	127
Figura 5.13: Cadera exterior derecha y Cadera interior	127
Figura 5.14: Diferentes vistas de la cadera	128
Figura 5.15: Manivela	128
Figura 5.16: Biela	129
Figura 5.17: Balancín	129
Figura 5.18: Estabilizador	130
Figura 5.19: Deslizadera	130
Figura 5.20: Fémur	131
Figura 5.21: Contrafémur	131
Figura 5.22: Tendón superior	132
Figura 5.23: Tendón inferior	132
Figura 5.24: Rodilla	133
Figura 5.25: Tibia	133
Figura 5.26: Peroné	134
Figura 5.27: Pie izquierdo	134
Figura 5.28: Pie derecho	135
Figura 5.29: Modelo colgado	136
Figura 5.30: Modelo en suelo	137
Figura 5.31: Simulación para el estudio del contacto	138
Figura 5.32: Simulación sencilla para el estudio de fricciones sólo con las juntas	144
Figura 5.33: Simulación sencilla para el estudio de fricciones sólo con las juntas con fricción	144

Figura 5.34: Manivela en posición vertical formando 90° con el eje X	150
Figura 5.35: Manivela en posición vertical formando 180° con el eje X	150
Figura 5.36: Manivela en posición vertical formando 270° con el eje X	151
Figura 5.37: Manivela en posición vertical formando 360° con el eje X	151
Figura 6.1: Tabla MSC.Adams Modificar Junta	166
Figura 6.2: Propiedades de fricción de una junta rotacional a ensayo	168
Figura 6.3: Juntas Rotacionales implementadas en MSC Adams.	169
Figura 6.4: Propiedades de fricción de una junta traslacional a ensayo	187
Figura 7.1: Modelo del bipedo PASIBOT en MSC Adams	208

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Coeficientes a tener en cuenta en el contacto entre dos materiales	100
Tabla 5.1: Propiedades del <i>Al 2024-T351</i>	107
Tabla 5.2: Propiedades del acero	116
Tabla 5.3: Propiedades de la cadera	127
Tabla 5.4: Propiedades de la manivela	128
Tabla 5.5: Propiedades de la biela	129
Tabla 5.6: Propiedades del balancín	130
Tabla 5.7: Propiedades del estabilizador	130
Tabla 5.8: Propiedades de la deslizadera	130
Tabla 5.9: Propiedades del fémur	131
Tabla 5.10: Propiedades del contrafémur	131
Tabla 5.11: Propiedades del tendón superior	132
Tabla 5.12: Propiedades del tendón inferior	132
Tabla 5.13: Propiedades de la rodilla	133
Tabla 5.14: Propiedades de la tibia	133
Tabla 5.15: Propiedades del peroné	134
Tabla 5.16: Propiedades del pie izquierdo	134
Tabla 5.17: Propiedades del pie derecho	135
Tabla 5.18: Parámetros de contacto “Impact” en función de los materiales empleados	142
Tabla 6.1: Juntas Pierna Derecha	170
Tabla 6.2: Juntas Piernas Izquierda	171
Tabla 6.3: Otras juntas	172
Tabla 6.4: Contacto tipo Impact	215
Tabla 6.5: Contacto tipo Restitution	242

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1: Desplazamiento vertical de la bola en función del tiempo	140
Gráfico 5.2: Desplazamiento vertical de la bola en función del tiempo variando el rozamiento	143
Gráfico 5.3: Par en la manivela según la implementación de fricciones a las juntas	145
Gráfico 5.4: Par en la manivela según la implementación de fricciones a las juntas corrigiendo el bulón	146
Gráfico 5.5: Par en la manivela según la implementación de fricciones a las juntas en 1 segundo	147
Gráfico 5.6: Par con todas las fricciones en las juntas y con distinto paso	148
Gráfico 5.7: Par con todas las fricciones en las juntas en 1 segundo	149
Gráfico 6.1: Movimiento eje Y, ambos pies 3 ciclos	155
Gráfico 6.2: Movimiento eje Y, ambos pies 1 ciclo	155
Gráfico 6.3: Movimiento eje Y, pie izquierdo 2 ciclos	156
Gráfico 6.4: Movimiento eje X, ambos pies 3 ciclos	157
Gráfico 6.5: Movimiento eje X, ambos pies 1 ciclo	157
Gráfico 6.6: Movimiento eje X, pie izquierdo 1 ciclo	158
Gráfico 6.7: Movimiento pie izquierdo en 1 ciclo	159
Gráfico 6.8: Movimiento pie derecho en 1 ciclo	159
Gráfico 6.9: Movimiento talón en 1 ciclo	161
Gráfico 6.10: Movimiento punta en 1 ciclo	161
Gráfico 6.11: Par motor en el modelo Restringido sin fricción	162
Gráfico 6.12: Par motor sin fricción a distintas velocidades durante 4seg	163
Gráfico 6.13: Par motor sin fricción a distintas velocidades durante un ciclo	164
Gráfico 6.14: Par motor modelo restringido juntas de revolucion ($\mu_s=5e-3$ y $\mu_d=3e-3$)	173
Gráfico 6.15: Par motor juntas rev ($\mu_s=5e-3$ y $\mu_d=3e-3$) distintas vel durante 8seg	174
Gráfico 6.16: Par motor juntas rev ($\mu_s=5e-3$ y $\mu_d=3e-3$) distintas vel durante un ciclo	175
Gráfico 6.17: Par motor modelo restringido juntas de revolucion ($\mu_s=7e-3$ y $\mu_d=5e-3$)	176
Gráfico 6.18: Par motor juntas rev ($\mu_s=7e-3$ y $\mu_d=5e-3$) distintas vel durante 8seg	177
Gráfico 6.19: Par motor juntas rev ($\mu_s=7e-3$ y $\mu_d=5e-3$) distintas vel durante un ciclo	178
Gráfico 6.20: Par motor modelo restringido juntas de revolucion ($\mu_s=3e-2$ y $\mu_d=1e-2$)	179
Gráfico 6.21: Par motor juntas rev ($\mu_s=3e-2$ y $\mu_d=1e-2$) distintas vel durante 8seg	180
Gráfico 6.22: Par motor juntas rev ($\mu_s=3e-2$ y $\mu_d=1e-2$) distintas vel durante un ciclo	181
Gráfico 6.23: Par motor modelo restringido juntas rev distintas vel durante un ciclo	183
Gráfico 6.24: Par motor modelo restringido juntas traslacion ($\mu_s=5e-3$ y $\mu_d=3e-3$)	188
Gráfico 6.25: Par motor juntas tras ($\mu_s=5e-3$ y $\mu_d=3e-3$) distintas vel durante 8seg	189
Gráfico 6.26: Par motor juntas tras ($\mu_s=5e-3$ y $\mu_d=3e-3$) distintas vel durante un ciclo	190
Gráfico 6.27: Par motor modelo restringido juntas traslacion ($\mu_s=3e-3$ y $\mu_d=1e-3$)	191



Gráfico 6.28: Par motor juntas tras ($\mu_s=3e-3$ y $\mu_d=1e-3$) distintas vel durante 8seg	192
Gráfico 6.29: Par motor juntas tras ($\mu_s=3e-3$ y $\mu_d=1e-3$) distintas vel durante un ciclo	193
Gráfico 6.30: Par motor modelo restringido juntas traslacion ($\mu_s=3e-2$ y $\mu_d=1e-2$)	194
Gráfico 6.31: Par motor juntas tras ($\mu_s=3e-2$ y $\mu_d=1e-2$) distintas vel durante 8seg	195
Gráfico 6.32: Par motor juntas tras ($\mu_s=3e-2$ y $\mu_d=1e-2$) distintas vel durante un ciclo	196
Gráfico 6.33: Par motor modelo restringido juntas tras distintas vel durante un ciclo	198
Gráfico 6.34: Par motor modelo restringido todas las juntas	200
Gráfico 6.35: Par motor todas las juntas distintas vel durante 8seg	201
Gráfico 6.36: Par motor todas las juntas distintas vel durante un ciclo	202



Capítulo 1:

Motivación y objetivos del proyecto

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Cuando se habla de robótica es necesario distinguir entre la robótica industrial, centrada en el estudio de robots manipuladores, y la robótica enfocada al diseño de robots móviles con diferentes grados de autonomía. La primera lleva estudiándose desde los años 50 y forma parte actualmente del tejido industrial de los países desarrollados principalmente en cadenas de montaje, fábricas de automóviles, etc.

Los robots móviles son máquinas que tienen la capacidad de desplazarse de un sitio a otro de forma telecontrolada o autónoma con el objeto de realizar una tarea para la cual han sido diseñados. Sin embargo, los robots móviles actuales no están adaptados al entorno doméstico de los humanos. En este campo han surgido en los últimos años numerosos proyectos encaminados a dotar a los robots de un cierto grado de humanidad, con una morfología similar a la humana y con el objetivo de hacerlos trabajar como robots de servicio en nuestras oficinas o domicilios.

Las tendencias tecnológicas actuales y futuras muestran un claro enfoque hacia la utilización de todo tipo de robots y dispositivos electrónicos en nuestra vida cotidiana que ayuden al ser humano a desarrollar de una forma más eficaz y con mayores garantías sus actividades. En este sentido, la robótica de servicio es una de las áreas de mayor auge entre las líneas de investigación en campos como la robótica y la automatización. En la actualidad, existen líneas de diseño de robots orientadas a diversas áreas muy diferentes, como pueden ser: asistencia personal, aplicaciones médicas, cadenas de montaje y otras muchas disciplinas.

Otra línea muy importante, de gran desarrollo durante las últimas décadas, ha sido la orientada al diseño de robots humanoides, que imiten las conductas humanas. Se pretende que estos robots puedan adaptarse a un entorno doméstico o laboral en situaciones en las que las habilidades humanas se encuentran limitadas, ya sean situaciones de riesgo o de gran precisión exigida, en contraste con las de gran potencia, precisión y fiabilidad que pueden mostrar algunos humanoides.

En esta línea, está trabajando el grupo de investigación MAQLAB, del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid. Su trabajo consiste en un proyecto de investigación en el campo de la robótica humanoide, más

concretamente se ha desarrollado un robot bípedo de tamaño natural que imita el comportamiento humano al caminar, el modelo “PASIBOT” (Figura 1.1)



Figura 1.1: Robot Pasibot

También el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos II de Madrid se incorporó ya hace algún tiempo al desarrollo de la robótica humanoide, fabricando su propio robot humanoide: el Rh-0 y Rh-1 (Figura 1.2 y Figura 1.3). Las diferencias entre ambos radican en el año de fabricación: el Rh-0 se fabricó en el año 2004 mientras que el Rh-1 fue en el año 2007 y en que el modelo Rh-1 incorpora una carcasa que el Rh-0 no lleva.



Figura 1.2: Robot Rh-0



Figura 1.3: Robot Rh-1

Una de las particularidades del robot Pasibot que se está desarrollando es su novedoso diseño, debido a que se trata de un diseño más ligero que el resto, con menos

actuadores y un solo grado de libertad proporcionado por un único motor capaz de accionar todas las articulaciones. Esta configuración le permite tener un menor peso, con lo que conlleva un menor consumo de energía.

Todo ello con el fin de que los costes económicos sean lo más reducido posible, premisa fundamental que se antoja indispensable en cualquier tipo de proyecto, logrando con esto una gran ventaja respecto al resto de sus homólogos.

La robótica es un campo en auge en la actualidad, en todas y cada una de las áreas de la industria, lo cual proporciona salidas profesionales para los ingenieros. Este es un aliciente bastante atractivo como para realizar un Proyecto fin de carrera sobre este tema.

Por lo tanto, la robótica es una de las líneas de investigación que se debe de potenciar hoy en día, ya que es una de las más importantes y con más futuro de seguir creciendo y expandiéndose.



Figura 1.4: Robots en una cadena de montaje de automóviles

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El desarrollo del robot bípedo Pasibot es un proyecto ambicioso en el campo de los robots de servicio. El PASIBOT cuenta con un solo grado de libertad, en contraposición con la gran mayoría de robots humanoides actuales que presentan un gran número de grados de libertad, repercutiendo por ello en un elevado peso debido a los diversos actuadores necesarios para producir el movimiento, con este robot se plantea una nueva concepción y un nuevo enfoque. Con éste modelo, de un solo grado de libertad, se consigue una configuración muy ligera que consigue reproducir el caminar humano de una manera muy representativa.

El objetivo que se pretende alcanzar con la realización de este proyecto es el de analizar y optimizar el diseño del robot Pasibot realizado por el Grupo *MAQLAB* (Laboratorio de Máquinas) con anterioridad, con el fin de detectar y corregir sus disfunciones y conseguir un funcionamiento del mismo más estable y funcional.

El objetivo principal del presente Proyecto Fin de Carrera, es el análisis cinemático del comportamiento del robot ante la implementación de fricciones en las juntas, tanto de rotación como de traslación para el modelo colgado

Se trata de un proyecto de colaboración en el que se trabajarán con el modelo del Pasibot colgado mientras Germán García Marcos hará lo propio con el modelo de suelo.

Con el fin de la consecución del objetivo principal, se detallan a continuación los objetivos que se deben alcanzar en el desarrollo del presente Proyecto Fin de Carrera:

- Analizar el modelo fabricado de Pasibot utilizando la herramienta informática SOLID EDGE. Esta réplica virtual permitirá realizar el análisis del robot y de sus mejoras sin necesidad de construir costosos prototipos físicos.
- Implementar el modelo obtenido en el programa ADAMS, logrando la simulación del robot ante la introducción de fricciones en las juntas y variando el tipo de contacto con la superficie de apoyo y realizando un análisis sobre el modelo para constatar el comportamiento del mismo.
- Analizar los resultados obtenidos y extraer conclusiones.
- Comparación de los resultados obtenidos con el modelo que carece de fricciones en sus juntas.

Finalmente, se redactará la presente memoria documental del proyecto.

FASES DEL PROYECTO

En cualquier proyecto de ingeniería hay que definir una serie de fases de desarrollo del mismo. En nuestro caso, al tratarse de un proyecto de innovación, se dispone de mayor libertad a la hora de diseñar ya que no se tienen ninguna restricción previa y queda a criterio de los investigadores la bondad del diseño final.

Las fases planificadas para el desarrollo de este proyecto son:

FASE 1. Estudios previos

En esta fase se plantean los objetivos, motivaciones y necesidades que el diseño debe cumplir. Se realiza un diseño conceptual y sobre él se hacen los estudios de viabilidad de forma analítica.

FASE 2. Diseño y simulación

En esta fase se realiza el modelado del mecanismo diseñado anteriormente. Una vez implementado se procederá a la simulación y obtención de datos. Posteriormente estos datos serán analizados, pudiendo provocar modificaciones en el modelo primario si los resultados obtenidos no son del todo satisfactorios.

FASE 3. Implementación final

Cuando los resultados del modelo virtual modificado son satisfactorios y acorde con los objetivos establecidos se procederá a implementar el modelo real y se someterá a las pruebas oportunas que determinen que se han alcanzado los objetivos previamente establecidos.

El presente proyecto se origina en diseños previos, pero con unas modificaciones que no han sido aún probadas analíticamente. Por lo tanto, este proyecto partiría de la FASE

2, implementando dicho modelo en un programa de CAD (SOLID EDGE) para ser a continuación simulado y comprobado (ADAMS).

Para el objetivo principal, únicamente habrá que introducir las fricciones en cada una de las juntas a partir del modelo inicial, y variar los tipos de contacto entre el robot y el suelo. Se analizarán los resultados y se compararán con el modelo inicial.

Una breve exposición de lo que se va a exponer en el presente proyecto sería lo siguiente:

1. Primero se modelará en SOLID EDGE un diseño del PASIBOT básico a partir de una versión con todas las características del mismo (rodamientos, arandelas, etc.) para la posterior exportación e interpretación por parte del programa informático MSC ADAMS 2007; software con el que haremos los diferentes análisis posteriormente. La utilización de esta última herramienta informática conlleva un aprendizaje previo. Éste aprendizaje será expuesto a modo de tutorial para la posterior utilización del mismo por parte de las sucesivas personas que tengan que trabajar con dicha herramienta. Se realizará un estudio a fondo del software MSC.ADAMS 2005, en el módulo View y PostProcessor, que es específico para el diseño y simulación de mecanismos así como la obtención de los resultados tanto numéricos como gráficos. Una vez realizado el estudio se generará un documento a modo de guía básica para el usuario de MSC.ADAMS View y PostProcessor.
2. Se introducirán las fricciones en cada una de las juntas, tanto de rotación como de traslación del modelo restringido (colgado) y se llevará a cabo la comparación entre el modelo sin fricción (inicial) y el modelo con fricciones (presente proyecto).
3. Se harán distintas simulaciones para el modelo colgado variando una serie de parámetros. Es un proyecto de colaboración con Germán García Marcos, quien realizará las pertinentes simulaciones del robot que se desplaza andando sobre una superficie. Variando los distintos valores de las fricciones se podrá valorar su comportamiento.
4. Se analizarán los cambios dinámicos producidos por el robot ante la variación de la velocidad de giro del motor que da lugar al movimiento del mismo.
5. Finalmente se confrontarán los resultados obtenidos en el presente proyecto como los obtenidos en el de Germán García Marcos

1.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente documento se encuentra dividido en siete capítulos, además de la bibliografía, el presupuesto y los anexos.

❖ CAPÍTULO 1. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

En este primer capítulo se exponen las motivaciones, objetivos, fases y estructura del proyecto.

❖ CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN

Se expone una introducción a la robótica. Se incluye también una clasificación para los distintos tipos de robots bípedos activos y pasivos más destacados.

❖ CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL PASIBOT

En este capítulo se describen los mecanismos que forman el Pasibot, y cómo a partir de estos realiza el movimiento. Estos mecanismos son el Pantógrafo y el Chebyshev, a partir de los cuales está basado el diseño del Pasibot.

❖ CAPÍTULO 4. MANUAL DE APRENDIZAJE DE MSC ADAMS

En este capítulo se ha recopilado un manual que realiza una breve descripción del software de diseño y simulación para MSC ADAMS, más concretamente del módulo View. Este manual describe la realización de tareas básicas para introducirse en el programa y poder manejarlo de una manera más cómoda. También se explicará de una manera más detallada como implementar las fricciones en las juntas de revolución y traslación, además del contacto entre el robot y el suelo, siendo estos los principales cometidos del presente proyecto.

❖ CAPÍTULO 5. MODELO TEÓRICO Y ESTUDIO DE FRICCIÓN EN MSC ADAMS

En este capítulo se realiza una descripción del Pasibot, desde el modelo teórico de partida hasta el modelo actual. Describe la evolución que ha llevado el robot, y se describen más en profundidad los mecanismos que forman la pierna.

También se describen sus partes, así como sus propiedades y la de sus componentes, con el fin de presentar en un mismo documento la máxima información posible referente al propio robot.

Finalmente, se presenta un breve estudio a través de unas simulaciones de mecanismos simples para conocer el alcance del contacto entre el robot y el suelo y la implementación de fricción en las juntas de revolución y traslacionales.

❖ CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo, se obtienen los resultados gráficos con el programa MSC Adams para el modelo colgado.

❖ CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se obtienen las conclusiones que se han alcanzado con el desarrollo del Proyecto. Se comparan los datos obtenidos para el modelo del robot restringido (presente proyecto) y el libre.(realizado por Germán García Marcos). Además, se exponen trabajos futuros relacionados con la optimización del prototipo.

❖ CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA

En este último capítulo se recogen las referencias bibliográficas empleadas.

❖ CAPÍTULO 9. PRESUPUESTO

Se elabora un presupuesto con el coste estimado del presente proyecto para la elaboración por parte de una empresa.

❖ ANEXOS

Se recogerá un estudio cinemático del comportamiento del Pasibot con el programa Working Model.



Capítulo 2:

Introducción

2.1. INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA

2.1.1 CONCEPTO DE ROBÓTICA

La robótica es la ciencia encaminada a diseñar y construir aparatos y sistemas capaces de realizar tareas propias de un ser humano o que requieren del uso de inteligencia. Se ocupa del diseño, manufactura y aplicaciones de los robots.

De forma general, la robótica se define como: el conjunto de conocimientos teóricos y prácticos que permiten concebir, realizar y automatizar sistemas basados en estructuras mecánicas poli articuladas, dotados de un determinado grado de inteligencia y destinados a la producción industrial o a la sustitución del hombre en muy diversas tareas.

La robótica combina diversas disciplinas: la mecánica, la electrónica, la informática, la inteligencia artificial y la ingeniería de control. También son importantes otras materias como el álgebra, los autómatas programables y las máquinas de estados.

Un sistema robótico se puede describir como “aquel que es capaz de recibir información, de comprender su entorno a través del empleo de modelos, de formular y de ejecutar planes, y de controlar o supervisar su operación”. La robótica es fundamentalmente pluridisciplinaria, apoyándose en gran medida en los progresos de la microelectrónica y de la informática, así como en los de nuevas disciplinas como el conocimiento de patrones y de inteligencia artificial.

2.1.2. HISTORIA DE LA ROBÓTICA

La historia de la Robótica ha estado unida a la construcción de "artefactos", muchas veces por obra de genios autodidactas que trataban de materializar el deseo humano de crear seres semejantes a nosotros que nos descargasen del trabajo. El ingeniero español Leonardo Torres Quevedo (que construyó el primer mando a distancia para su torpedo automóvil mediante telegrafía sin hilos, el primer trasbordador aéreo y otros muchos ingenios) acuñó el término "automática" en relación con la teoría de la automatización de tareas tradicionalmente asociadas a los humanos.

Si algún autor ha influido sobre manera en la concepción del universo de los robots de ficción, éste ha sido sin duda alguna Isaac Asimov. Muchos otros, desde luego, han escrito sobre robots, pero ninguno ha relatado tan minuciosamente las actitudes y posibilidades de estas máquinas como lo ha hecho él.

Tanto es así, que el Oxford English Dictionary reconoce a Asimov como inventor de la palabra "robótica" y, aunque todos conocemos la facilidad de los anglófonos para inventar palabras nuevas, no por ello tiene mucho mérito.

Cuando tenía 22 años, Asimov escribió su cuarto relato corto sobre robots. El círculo vicioso. En boca de unos de sus personajes planteó lo que consideraba axiomas básicos para el funcionamiento de un robot, estableciendo las tres leyes de la robótica:

Un robot no puede hacer daño a un ser humano o, por inacción, permitir que un ser humano sufra daño.

- Un robot debe obedecer las órdenes dadas por los seres humanos, excepto si estas órdenes entrasen en conflicto con la Primera Ley.
- Un robot debe proteger su propia existencia en la medida que esta protección no entre en conflicto con la Primera o la Segunda Ley.

Esta redacción de las leyes es enunciada de forma convencional por los humanos de las historias. Su forma real sería la de una serie de instrucciones equivalentes y mucho más complejas en el cerebro del robot.

2.1.3. HISTORIA DE LAS LEYES DE LA ROBÓTICA

Estas leyes surgen como mecanismo de protección para los seres humanos. Según el propio Asimov, la concepción de las leyes de la robótica quería contrarrestar un supuesto “complejo de Frankenstein”, es decir, un temor que el ser humano desarrollaría ante unas máquinas que hipotéticamente pudieran rebelarse y alzarse contra sus creadores.

Los primeros robots contruidos eran modelos poco avanzados. Era una época en donde no estaba muy bien desarrollada la “robopsicología”. Estos robots podían ser enfrentados en situaciones en las cuales se vieran en un conflicto con las leyes mencionadas anteriormente. Una de las situaciones más sencillas se da cuando un robot debe dañar a un

ser humano para evitar que dos o más sufran daño. En esta ocasión los robots decidían en función de un criterio exclusivamente cuantitativo, quedando luego inutilizados, al verse forzados a violar la primera ley.

Desarrollos posteriores en la robótica, permitieron la construcción de circuitos más complejos, permitiendo una mayor capacidad de autorreflexión. Una peculiaridad de los robots es que pueden llegar a redefinir su concepto de daño según sus experiencias e incluso, llegar a determinar niveles del mismo. Su valoración de los seres humanos también puede ser determinada por el ambiente.

Es así que un Robot puede llegar a dañar a un ser humano por proteger a otro que considere de más valía (su amo por ejemplo). También podría darse el caso de que un Robot dañara físicamente a un ser humano para evitar que otro sea dañado psicológicamente, pues llega a ser una tendencia el considerar los daños psicológicos más graves que los físicos.

Estas situaciones nunca se hubieran dado en Robots más antiguos. Asimov plantea en sus historias de Robots las más diversas situaciones, siempre considerando las posibilidades lógicas que podrían llevar a los Robots a tales situaciones.

Uno puede llegar a encariñarse con los Robots de Asimov, él que nos muestra en sus historias Robots cada vez más "humanos". En El hombre bicentenario, Asimov nos narra la historia de Andrew Martín, nacido Robot, y que luego de una vida de lucha, logró morir como un ser humano. Están también R. Daneel Olivaw y R. Giskard Reventlov, los cuales tienen un papel fundamental en la segunda expansión de los seres humanos y la posterior fundación del imperio galáctico. Estos dos personajes son importantes en la medida en que, siendo los Robots más complejos jamás creados, fueron capaces de desarrollar la Ley Cero de la robótica (Zeroth law):



Figura 2.1: El hombre Bicentenario

“Un robot no puede hacer daño a la humanidad o, por inacción, permitir que la humanidad sufra daño”.

Se supone que la Ley Cero sería el resultado de la reflexión filosófica por parte de estos robots más sofisticados.

La robótica se ha caracterizado por el desarrollo de sistemas cada vez más flexibles, versátiles y polivalentes, mediante la utilización de nuevas estructuras mecánicas y de nuevos métodos de control y percepción.

La robótica ha alcanzado un nivel de madurez bastante elevado en los últimos tiempos, y cuenta con un correcto aparato teórico. Sin embargo, algunas cosas que para los humanos son muy sencillas, como andar, correr o coger un objeto sin romperlo, requieren una potencia de cálculo para igualarlas que no está disponible todavía.

Sin embargo se espera que el continuo aumento de la potencia de los ordenadores y las investigaciones en inteligencia artificial, visión artificial y otras ciencias paralelas nos permitan acercarnos un poco más cada vez a los milagros soñados por los primeros ingenieros y también a los peligros que nos adelanta la ciencia ficción.

2.1.4 LA PREHISTORIA

En 1920 fue escrita por Karel Capek la obra RUR (Robots Universales Rossum) logrando popularizar en ella el término robot, que fue traducido de la palabra checa robota, que significa *trabajos forzados*. Sin embargo, en casi todos los mitos de las diversas culturas se puede encontrar una referencia a la posibilidad de crear un ente con inteligencia, desde el Popol-Vuh de nuestros antepasados mayas hasta el Golem del judaísmo.

Ya en la época de los griegos se intentó crear dispositivos que tuvieran un movimiento sin fin, que no fuera controlado ni supervisado por personas, en los siglos XVII y XVIII la construcción de autómatas humanoides fabricados con mecanismos de relojería por Jacques de Vaucanson, Pierre Henri-Louis, Jaquet- Droz, como el escribiente, the Draughtsman, el músico Henri Maillart det (1800), Olimpia de la ópera de Offenback de Hoffman, fortalecieron la búsqueda de mecanismos que auxiliaran a los hombres en sus tareas.

Estos autómatas desataron controversias alrededor de la posible inteligencia que pudieran tener estos dispositivos pesados y en la búsqueda de la posibilidad de crear vida artificialmente. El escritor hacía mofa de la frase de Descartes de "Pienso luego existo" parafraseándola al escribir "Escribo luego existo". Los fraudes surgieron como en el caso del ajedrecista, en el que un muñeco mecánico daba respuesta a jugadas de ajedrez, comprobándose más tarde que era un enano encerrado en la caja del muñeco el que daba las respuestas y movía el muñeco. Todos estos mitos anteceden a la obra Capek, en la que se plantea la construcción de robots para liberar a las personas de la carga pesada de trabajo. Sin embargo, esta ficción y la creada por Asimov, junto con los desarrollos mecánicos de máquinas como el telar de Thailard, motiva a George Devol a crear el origen de los Robots industriales, un manipulador que sería parte de una célula de trabajo.

2.1.5 DESARROLLO HISTÓRICO

Han pasado varios siglos desde las sondas espaciales que se pueden encontrar actualmente, hasta los primeros autómatas, pero si realmente se quiere hablar de inteligencia, habría que contar desde hace treinta años en adelante. Han sido pocos años,

pero muy intensos y el interés que ha despertado en todo el mundo es superior a su concepción inicial, siguiendo un proceso paralelo a la introducción de los ordenadores en las actividades cotidianas de la vida humana. No obstante, los robots aún no han encontrado la forma de inserción en los hogares, aunque sí se han convertido en elementos imprescindible en la mayoría de las industrias.

La robótica es una ciencia que ofrece grandes avances, además de un amplio campo para el desarrollo y la innovación tecnológica, siendo éste último aspecto el que motiva a muchos investigadores y aficionados a seguir adelante con los robots y que éstos a su vez sean cada vez más evolucionados y complejos.

2.1.5.1 EL HOMBRE DE PALO

El primer autómatas digno de mencionar del que existen noticias, se cree que fue construido durante la primera mitad del siglo XVI. Su creador fue Giovanni Torriani, más conocido como Juanelo Turriano, inventor, arquitecto y Relojero Real de Carlos V. El invento simula la figura de un monje de la época. Consistía en un aparato antropomórfico de madera, construido con el fin de recolectar limosnas. Funcionaba mediante un mecanismo de resorte al que se le daba cuerda con una llave.

El monje era capaz de inclinar la cabeza y girar, mover los ojos de un lado a otro, abrir la boca y golpear el pecho con la mano derecha mientras movía la izquierda.

Dice la leyenda, que dicho artefacto era capaz de andar buscando la caridad de los viandantes, y que incluso era capaz de inclinarse en una reverencia cuando recibía alguna moneda. No hay muchos documentos históricos acerca de la naturaleza del autómatas, debido a que fueron quemados, aunque sí ha quedado constancia en el punto donde se localizaba: en la actualmente denominada “Calle del Hombre de Palo” en Toledo.

2.1.5.2 EL PATO CON APARATO DIGESTIVO

Jacques de Vaucanson fue un ingeniero e inventor francés del siglo XVIII al cuál se le acredita la creación del primer robot así como la creación el primer telar completamente automatizado.

En 1737, construyó su primer autómatas, El Flautista, una figura de tamaño natural a un pastor que tocaba el tambor y la flauta. Tenía un repertorio de doce canciones.

En 1738 creó dos autómatas más: el *tamborilero* y el *pato con aparato digestivo* (Figura 2.2), siendo ésta última creación su obra maestra. El pato tenía más de 400 partes móviles y podía batir sus alas, beber agua, digerir grano, y hasta defecar.

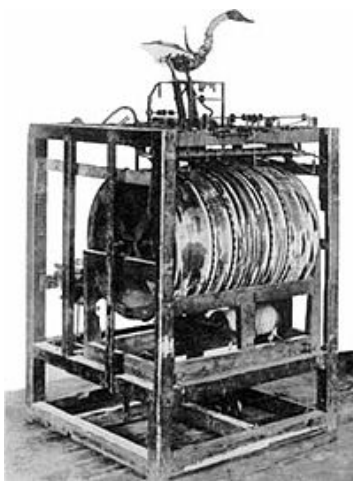


Figura 2.2: Autómata del pato con aparato digestivo.

2.1.5.3. LA MUÑECA ESCRIBANA

Fue a primeros del siglo XIX cuando un mecánico llamado Maillardet creó un autómatas capaz de escribir. La máquina, de apariencia femenina, podía escribir en inglés y francés y además hasta dibujaba paisajes.

Años más tarde se creó un autómatas más complejo aún, tomando como base el modelo de Maillardet. Su autor fue Jaquet-Droz y su creación fue bautizada como “El Escritor” (Figura 2.3). Se trata de un mecanismo compuesto por más de 6.000 piezas y seis años de trabajo. Al igual que el diseño de Maillardet, tenía forma de niño, y podía escribir en francés y en inglés, y realizar algunos dibujos. En esta nueva versión, más evolucionada, además de realizar todo lo anterior, el robot podía escribir utilizando la pluma gracias a una

rueda integrada en su mecanismo interno donde se seleccionaban los caracteres uno a uno pudiendo escribir así pequeños textos de unas cuarenta palabras de longitud. Realizaba movimientos propios de un ser humano como mojar la tinta y escribir el sobrante para no manchar el papel, levantar la puma como si estuviera pensando, respetaba los espacios y puntos y puntos y aparte, además de seguir con la mirada el papel y la pluma mientras escribía.



Figura 2.3: El escritor, de Jaquet-Droz

2.1.5.4. PRIMERAS APROXIMACIONES

En el siglo XX es cuando los autómatas se toman más en serio y comienzan a ser utilizados en aplicaciones prácticas.

Como sucede siempre que la necesidad apremia, durante la Segunda Guerra Mundial, los científicos tuvieron que ingeniárselas para poder manejar los elementos radioactivos.

Con este fin, se construyen los llamados *teleoperadores*, que lejos aún de ser robots, son la primera aproximación conseguida por los ingenieros. Se basaban en dispositivos mecánicos que eran capaces de reproducir las acciones realizadas por un operador situado a distancia. El efecto que se conseguía con ello era el de tener brazos y manos muy largas.

Algunos años más tarde, los dispositivos mecánicos se sustituyeron por conexiones eléctricas, quedando algo menos ortopédicos y más parecido a los robots que se presentan actualmente.

2.1.6. UNA INDUSTRIA NOVEDOSA

En el siglo XX, hasta los años 70, se puede hablar de una industria en auge.

Joseph Engelberger, también conocido como *el "Padre de la Robótica"*, fue el primero en reconocer el potencial que encerraban las máquinas automatizadas. El propio Engelberger confesó que fue tras la lectura del libro *"Yo robot"* de Asimov, cuando decidió a dedicar su vida a la robótica.

Engelberger, que por entonces, en los años 50, cursaba estudios en la Universidad de Columbia, coincidió en un cóctel con un inventor también apasionado por los robots: George Charles Devol.

Charles Devol fue quien estableció las bases del robot industrial moderno.

Con el objetivo de diseñar una máquina flexible, adaptable al entorno y de fácil manejo, George Devol patentó en 1948 un manipulador programable que fue más tarde, el embrión del robot industrial.

El espíritu comercial de Engelberger unido a las patentes de Devol dio como resultado el inicio de una industria que ni siquiera sus creadores pudieron imaginar hasta dónde iba a llegar.

Juntos fundaron la compañía Unimation, la primera empresa de robótica de la historia. Se dedicaba a la creación de patentes de máquinas automatizadas. A principios de los años setenta habían diseñado y producido un montón de maquinaria automática de todo tipo.

En 1960 consiguieron un contrato con la General Motors para instalar un brazo robótico, el *Unimate* (figura 2.4), en su fábrica de Trenton (Nueva Jersey). La máquina, con un peso de 1.800 kg, fue considerada el primer robot industrial de la historia y su función era la de levantar y apilar grandes piezas de metal caliente.

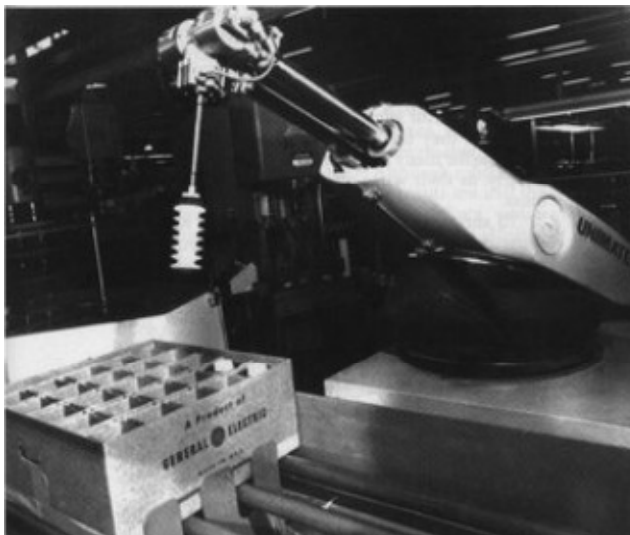


Figura 2.4: Robot Unimate de Devol

En 1968 consiguieron firmar acuerdos con Kawasaki para la construcción de robots del tipo Unimate.

Con la aparición del microchip, lograron resolver los problemas con las computadoras utilizadas para el control de los robots, que por entonces eran poco manejables y demasiado caros. A partir de entonces, Unimation se convirtió en una de las empresas más rentables de todo el mundo. Por ello se otorgaron a Engerberger y Devol los bien merecidos títulos de “Padre” y “Abuelo” de la Robótica Industrial, respectivamente.

En 1970 se organiza el primer Simposio Internacional de Robots Industriales, ISIR.

Las asociaciones más importantes de la época eran: JIRA (Japan Industrial Robot Association), RIA (Robot Industries Association) y BRA (British Robot Association).

Paralelamente, las patentes y los robos seguían en auge. Se empezaba a hablar de cálculo de trayectorias, sensorización, retroalimentación y sistemas servodirigidos.

2.2. DEFINICIÓN DE ROBOT

Un robot es un dispositivo generalmente mecánico, que desempeña tareas automáticamente, ya sean de acuerdo a la supervisión humana directa, a través de un programa predefinido o siguiendo un conjunto de reglas generales, utilizando técnicas de inteligencia artificial. Generalmente estas tareas reemplazan, asemejan o extienden el

trabajo humano, como ensamble en líneas de manufactura, manipulación de objetos pesados o peligrosos, trabajo en el espacio, etc.

Un Robot también se puede definir como una entidad hecha por el hombre con un cuerpo y una conexión de retroalimentación inteligente entre el sentido y la acción (no bajo la acción directa del control humano). Usualmente, la inteligencia es un ordenador o un microcontrolador ejecutando un programa. Sin embargo, se ha avanzado mucho en el campo de los robots con inteligencia alámbrica. Las acciones de este tipo de Robots son generalmente llevadas a cabo por motores o actuadores que mueven extremidades o impulsan al Robot.

La RIA (Robot Industries Association) lo define así: un robot es un manipulador reprogramable y multifuncional, diseñado para mover cargas, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variadas y programadas. En resumen se puede decir:

Su característica fundamental es poder manejar objetos (manipulador). Un robot se diseña con este fine, teniendo en cuenta que ha de ser muy versátil a la hora de utilizar herramientas y manejarlas.

La segunda peculiaridad que le diferencia de otras máquinas automáticas es su capacidad para realizar trabajos completamente diferentes adaptándose al medio, e incluso pudiendo tomar decisiones, es decir, multifuncional y reprogramable.

Así mismo, el término robot, ha sido utilizado como un término general que define a un hombre mecánico o autómatas, que imita a un animal ya sea real o imaginario, pero se ha venido aplicando a muchas máquinas que reemplazan directamente a un humano o animal en el trabajo o el juego. Esta definición podría implicar que un robot es una forma de biomimetismo.

2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS

Hay varios tipos de clasificación para los robots. Dos de los más utilizados son:

2.3.1 CLASIFICACIÓN POR GENERACIONES

Ningún autor se pone de acuerdo en cuántos y cuáles son los tipos de robots y sus características esenciales. La más común es la que a continuación se expone:

- 1ª Generación. Manipuladores. Son sistemas mecánicos multifuncionales con un sencillo sistema de control, bien manual, de secuencia fija o de secuencia variable.
- 2ª Generación. Robots de aprendizaje. Repiten una secuencia de movimientos de movimientos que ha sido ejecutada previamente por un operador humano. El modo de hacerlo es a través de un dispositivo mecánico. El operador realiza los movimientos requeridos mientras el robot le sigue y los memoriza.
- 3ª Generación. Robots con control sensorizado. El controlador es una computadora que ejecuta las órdenes de un programa y las envía al manipulador para que realice los movimientos necesarios.
- 4ª Generación. Robots inteligentes. Son similares a los anteriores, pero además poseen sensores que envían información a la computadora de control sobre el estado del proceso. Esto permite una toma inteligente de decisiones y el control del proceso en tiempo real.

2.3.2 CLASIFICACIÓN SEGÚN SU ARQUITECTURA

La arquitectura, que es definida por el tipo de configuración general del Robot, puede ser metamórfica. El concepto de metamorfismo, de reciente aparición, se ha introducido para incrementar la flexibilidad funcional de un robot a través del cambio de su configuración por el propio robot. El metamorfismo admite diversos niveles, desde los más elementales (cambio de herramienta o de efecto terminal), hasta los más complejos como el cambio o alteración de algunos de sus elementos o subsistemas estructurales.

Los dispositivos y mecanismos que pueden agruparse bajo la denominación genérica del robot, tal como se ha indicado, son muy diversos y es por tanto difícil establecer una clasificación coherente de los mismos que resista un análisis crítico y riguroso. La subdivisión de los robots, con base en su arquitectura, se hace en los siguientes grupos: poliarticulados, móviles, andróides, zoomórficos e híbridos.

Poliarticulados

Bajo este grupo están los robots de muy diversa forma y configuración cuya característica común es la de ser básicamente sedentarios (aunque excepcionalmente pueden ser guiados para efectuar desplazamientos limitados) y estar estructurados para mover sus elementos terminales en un determinado espacio de trabajo según uno o más sistemas de coordenadas y con un número limitado de grados de libertad". En este grupo se encuentran los manipuladores, los robots industriales, los robots cartesianos y se emplean cuando es preciso abarcar una zona de trabajo relativamente amplia o alargada, actuar sobre objetos con un plano de simetría vertical o reducir el espacio ocupado en el suelo.



Figura 2.5: Robot poliarticulado de paletización de cargas unitarias

Móviles

Son robots con grandes capacidad de desplazamiento, basados en carros o plataformas y dotados de un sistema locomotor de tipo rodante. Siguen su camino por telemando o guiándose por la información recibida de su entorno a través de sus sensores. Las tortugas motorizadas diseñadas en los años cincuentas, fueron las precursoras y sirvieron de base a los estudios sobre inteligencia artificial desarrollados entre 1965 y 1973 en la Universidad de Stanford.

Estos robots aseguran el transporte de piezas de un punto a otro de una cadena de fabricación. Guiados mediante pistas materializadas a través de la radiación electromagnética de circuitos empotrados en el suelo, o a través de bandas detectadas fotoeléctricamente, pueden incluso llegar a sortear obstáculos y están dotados de un nivel relativamente elevado de inteligencia.

Androides o Bípedos

Son robots que intentan reproducir total o parcialmente la forma y el comportamiento cinemática del ser humano. Actualmente los androides son todavía dispositivos muy poco evolucionados y sin utilidad práctica, y destinados, fundamentalmente, al estudio y experimentación.

Uno de los aspectos más complejos de estos robots, y sobre el que se centra la mayoría de los trabajos, es el de la locomoción bípeda. En este caso, el principal problema es controlar dinámica y coordinadamente en el tiempo real el proceso y mantener simultáneamente el equilibrio del robot.

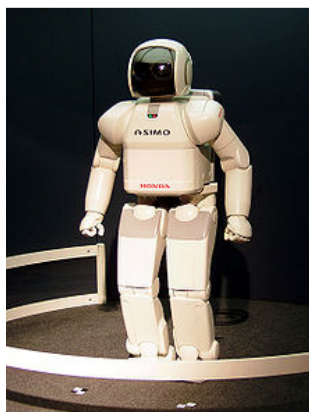


Figura 2.6: Robot bípedo Asimo

Los robots bípedos se pueden clasificar a su vez en:

- **Activos:** Para realizar su movimiento necesitan motores o actuadores. Se trata de sistemas de control complejos en los que también se utilizan sensores.
- **Pasivos:** Al contrario que los activos, para realizar su movimiento no necesitan ningún tipo de actuador o motor. Se valen de la acción de la gravedad y pendiente del terreno. Su principal ventaja frente a los activos es que no requieren el uso de energía, mientras que la gran desventaja que presentan es que no pueden subir pendientes.
- **Semiactivos:** Sería una combinación de las dos clases anteriores.

Zoomórficos

Los robots zoomórficos, que considerados en sentido no restrictivo podrían incluir también a los androides, constituyen una clase caracterizada principalmente por sus sistemas de locomoción que imitan a los diversos seres vivos.

A pesar de la disparidad morfológica de sus posibles sistemas de locomoción es conveniente agrupar a los robots zoomórficos en dos categorías principales: caminadores y no caminadores. El grupo de los robots zoomórficos no caminadores está muy poco

evolucionado. Cabe destacar, entre otros, los experimentados efectuados en Japón basados en segmentos cilíndricos biselados acoplados axialmente entre sí y dotados de un movimiento relativo de rotación. En cambio, los robots zoomórficos caminadores son muy numerosos y están siendo experimentados en diversos laboratorios con vistas al desarrollo posterior de verdaderos vehículos terrenos, pilotados o autónomos, capaces de evolucionar en superficies muy accidentadas. Las aplicaciones de estos Robots serán interesantes en el campo de la exploración espacial y en el estudio de los volcanes.



Figura 2.7: Robot zoomórfico Spirit

Híbridos

Estos robots corresponden a aquellos de difícil clasificación cuya estructura se sitúa en combinación con alguna de las anteriores ya expuestas, bien sea por conjunción o por yuxtaposición. Por ejemplo, un dispositivo segmentado articulado y con ruedas, es al mismo tiempo uno de los atributos de los robots móviles y de los robots zoomórficos.

De igual forma pueden considerarse híbridos algunos robots formados por la yuxtaposición de un cuerpo formado por un carro móvil y de un brazo semejante al de los robots industriales.

En parecida situación se encuentran algunos robots antropomorfos y que no pueden clasificarse ni como móviles ni como andróides, tal es el caso de los Robots personales.

Las características con las que se clasifican principalmente los robots son:

- Propósito o función
- Sistema de coordenadas empleado
- Número de grados de libertad del efecto formal
- Generación del sistema de control

2.4. FUNDAMENTOS DE LA MARCHA BÍPEDA

El modo de caminar de los robots bípedos no es sino una aproximación lo más real posible al caminar humano. Durante el caminar de los bípedos existe una premisa fundamental que se ha de cumplir siempre y es que por lo menos uno de los dos pies mecánicos ha de estar apoyado en el suelo. Esto para los seres humanos no es del todo imprescindible ya que cuando corremos hay momentos en los que tenemos ambos pies en el aire.

Los dos mayores componentes del ciclo de la marcha son: la fase de apoyo y la fase de balanceo. Una pierna está en fase de apoyo cuando está en contacto con el suelo y en fase de balanceo cuando no contacta con el suelo. La cantidad relativa de tiempo gastado durante cada fase del ciclo de la marcha, a una velocidad normal, es:

Fase de apoyo: 60% del ciclo

Fase de balanceo: 40% del ciclo

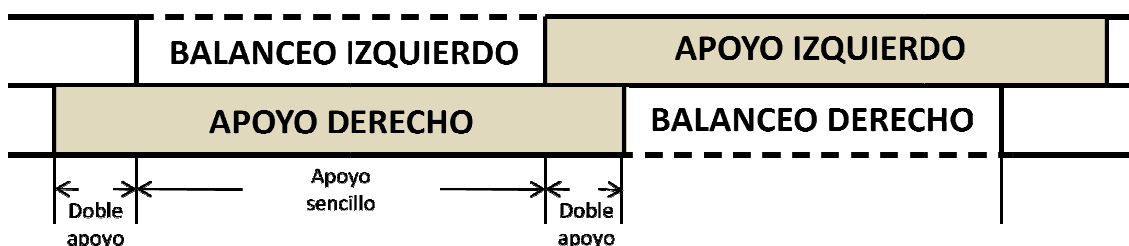


Figura 2.8: Ciclo de la marcha

Con el aumento de la velocidad de la marcha hay un aumento relativo en el tiempo gastado en la fase de balanceo, y con la disminución de la velocidad una relativa disminución. La duración del doble apoyo disminuye cuando se aumenta la velocidad de la marcha.

La caminata comienza con los dos pies extendidos y sobre el suelo. Al estar ambos pies apoyados el equilibrio del robot en este instante es perfecto por lo que el equilibrio no es significativo. Esta fase es la que se ha nombrado como doble apoyo.

El gran problema comienza al levantar uno de los pies para realizar el avance ya que la tendencia es caer hacia ese lado y hacia delante o hacia atrás, dependiendo del estado dinámico del robot en ese instante. Esta fase se conoce como apoyo monopodal o simple del pie que está en contacto con el suelo y fase de balanceo del otro.

El medio ciclo se completa cuando los dos pies vuelven a estar en el suelo y nos encontramos de nuevo en fase de doble apoyo.

El otro medio ciclo es idéntico, solamente que el pie que se levanta es el que anteriormente servía de apoyo y viceversa.

2.5. HISTORIA DE LOS ROBOTS BÍPEDOS

A lo largo de los años siempre se ha intentado imitar el movimiento humano a la hora de caminar. Con la aparición de los robots humanoides este interés aumentó.

La forma más repetitiva que tenían los investigadores de representar la pierna en los robots bípedos era similar a la humana, donde fémur, tibia y pie eran eslabones conjuntos (cadera, rodilla y tobillo) que a su vez eran accionados bien por motores o por actuadores. Hubo unos pocos investigadores que apostaron por un tipo de movimiento diferente, en el cual consistía en la combinación de mecanismos clásicos, consiguiendo que el desplazamiento de ciertas juntas fuera el resultado de la dinámica del mecanismo.

El presente proyecto aborda cómo mediante el diseño de un robot bípedo se puede alcanzar de la forma más similar posible el caminar humano. Se profundizará en la evolución de este tipo de robots a lo largo de la historia, utilizando para ello la clasificación anterior: activos y pasivos.

Inicialmente, se conseguía el movimiento de cada elemento de la pierna mediante un motor independiente, es decir, en cada una de sus articulaciones (cadera, fémur, peroné, tibia y pie) había presente un motor. Con esta configuración se conseguía el movimiento del robot mediante la dinámica del mecanismo.

Actualmente, el diseño de los robots humanoides es una de las líneas de investigación más importantes en el campo de la robótica. Se han desarrollado distintos tipos e humanoides que se detallarán a continuación.

El país que está siendo la punta de la lanza en este desarrollo por los robots humanoides, sin lugar a dudas es Japón. En Japón han sido desarrollados los prototipos más novedosos y conocidos, mientras que en el resto del mundo el número de prototipos y su sofisticación es menor. En España cabe destacar los robots Rh-0 y Rh-1.

2.5.1 ROBOTS BÍPEDOS PASIVOS

Los robots pasivos fueron cronológicamente los primeros. Se caracterizaban por poder caminar sin necesidad de control ni de ningún tipo de motor o actuador, es decir, su movimiento era generado únicamente por la acción de la fuerza de la gravedad. Se trataba de un modelo mecánico muy eficaz debido a la alta relación eficiencia-energía de la que disponía. La gran ventaja es que no necesitaban energía externa para caminar, mientras que la gran desventaja era que su direccionalidad estaba limitada, y era prácticamente imposible que este tipo de robots subieran pendientes.

Los robots dinámicos pasivos fueron inventados y desarrollados por el ingeniero aeronáutico Tad McGeer entre 1988 y 1992. McGeer se inspiró en unos cálculos realizados una década antes por Tom McMahon en la Universidad de Harvard, ayudado por un alumno suyo: Simon Mochon. A McMahon le vino la inspiración a partir de un juguete que le regalaron en la década de los años 1950. Ese juguete, es más que probable que se tratase de un “*Wilson Walkie*” (Figura 2.7) hecho de madera y tela.



Figura 2.9: Wilson Walkie

A partir de los trabajos de McGeer y sus ayudantes no ha habido un avance muy destacado en el campo de la robótica pasiva, aunque cabe destacar algunos modelos relevantes a lo largo de la historia.

El primer modelo que destacó fue el modelo de Martin Wisse (Figura 2.8), realizado en la Universidad de Cornell en el año 1998, con la ayuda de Andy Ruina. Wisse continuó desarrollando y evolucionando el modelo de McGeer, hasta alcanzar un andador pasivo dinámico en 3D con rodillas, basado en simulaciones en 2D.

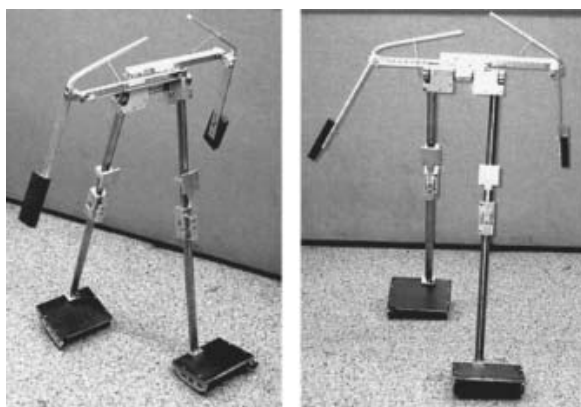


Figura 2.10: Robot bípedo pasivo de Wisse y Ruina.

Tras este avance, algunas universidades han conseguido diseñar otros robots bípedos pasivos que imiten en caminar humano, mejorando el modelo de Wisse-Ruina. Tres equipos de investigación de las universidades de Cornell, Delft (Holanda) y el MIT han logrado construir robots cuyos pasos y movimiento se parecen a la forma de andar de los humanos. Fueron presentados en febrero del año 2005 en la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia (AAAS), y los tres se basan en el mismo principio: suponen una extensión de varios años de investigación en robots cuyo sistema de movimiento tengan un diseño dinámico pasivo.

Robot Ranger de la Universidad de Cornell

El Robot Ranger desarrollado por Andy Ruina en la Universidad de Cornell es el más pesado de todos los modelos. Sus piernas miden un metro de largo (incluyendo tobillos, rodillas y caderas) sólo es capaz de caminar hacia delante y pesa 26 libras. Además consta de dos brazos, una barra corta en el lugar del torso, una caja plana por cabeza que aloja un pequeño microcontrolador, algo de electrónica y programación muy sencilla (ya que gran parte del problema de los controles se soluciona a través del diseño mecánico del

robot) y un par de baterías a cada lado. Se balanceaba como una persona con muletas, pero no se cayó. Anduvo un kilómetro en círculos por la pista de atletismo de la Universidad de Cornell. Un logro sin precedentes.



Figura 2.11: Robot Ranger.

Robots Toddlers del MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts)

Los robots del MIT son conocidos como los “Toddlers”, son los más sofisticados ya que pueden caminar en otras direcciones, pesan unas cinco libras y miden 43 centímetros de alto. El Toddler también muestra un sistema de aprendizaje nuevo, que permite que el robot se adapte de forma continua al terreno sobre el que se mueve. Estos nuevos avances en robótica podrían transformar los actuales sistemas de diseño y control de robots, y podrían ser aplicados al desarrollo de prótesis robóticas.

El robot del MIT utiliza un programa de aprendizaje que aprovecha dicho diseño y permite que el robot se enseñe a sí mismo a andar en menos de 20 minutos. Precisamente su apodo, "Toddler" (el término inglés para un niño pequeño que empieza a andar) se deriva de su capacidad de aprender a andar y la forma en la que lo hace.

Este modelo de robot es uno de los primeros robots en utilizar un programa de aprendizaje y es el primero en andar sin tener información previamente implantada en sus controles. Además el sistema de aprendizaje permite que el robot se mueva con eficacia por una variedad de superficies y, en el futuro, podría permitir que se muevan por terreno muy

rocoso. Esto se debe a que el programa funciona con tanta velocidad que el robot puede adaptarse de forma continua al tipo de terreno.

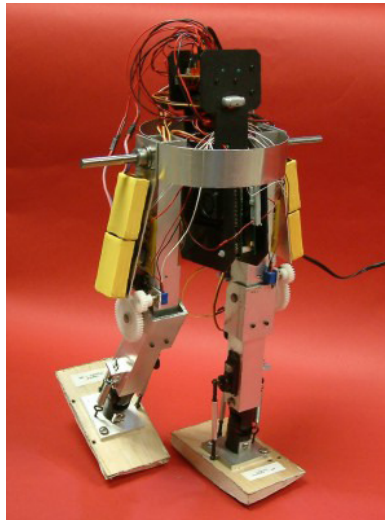


Figura 2.12: Robot Toddler del MIT

Robot Denise de la Universidad de Delft

Por último tenemos al robot holandés Denise, con 16 libras de peso y 1.5 metros de largo. Sólo camina hacia delante y su programación es muy sencilla, debido a que gran parte del problema de los controles se soluciona a través del diseño mecánico del robot. Su funcionamiento y diseño es parecido al del robot Ranger.



Figura 2.13: Robot Denise

2.5.2 ROBOTS BÍPEDOS ACTIVOS

El campo de la robótica bípeda activa (humanoides), si ha tenido una mayor investigación y un mayor desarrollo. Los robots humanoides actuales están formados por un alto número actuadores, utilizados para controlar el elevado número de grados de libertad que poseen. Un criterio destacado sobre la estabilidad es el criterio del Punto de Momento Cero (ZMP) de Vukobratovic. El punto de momento cero es un concepto muy importante en la resolución del movimiento de un robot bípodo, como es el caso de los humanoides.

Mantener la estabilidad dinámica no es tarea fácil, ya que el torso del robot tiene más masa e inercia que las piernas, las cuales tienen que soportar todo el peso. El punto de momento cero es aquél en el que la componente tangencial del momento resultante de la inercia, la fuerza de la gravedad y las fuerzas externas es cero. El concepto del momento cero implica el cálculo de las ecuaciones del momento angular, para garantizar que las trayectorias de las articulaciones respetan la estabilidad. Se establece una región de estabilidad, y mientras dicho punto se encuentre dentro de ella no habrá ningún problema. Dependiendo de dónde esté este punto, la estabilidad será mayor o menor.

Cronológicamente muchos investigadores y universidades han sido los que han fabricado diferentes tipos de humanoides mejorando a cada paso los progresos anteriores. En cuanto a los países participantes en este desarrollo cabe destacar sobre todo a Japón que sin duda es el pionero de los mejores diseños en el campo de la robótica.

Estos son algunos de los modelos más destacados a lo largo de la historia:

1. ELEKTRO (1939)

El robot ELEKTRO fue presentado en la feria mundial de 1939 en Nueva York. Podía caminar por comando de voz, hablar (usando un tocadiscos de 78-rpm), podía fumar, inflar globos, y mover la cabeza y los brazos.

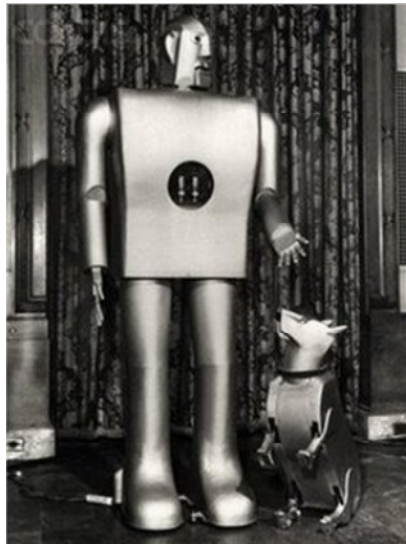


Figura 2.14: Robot ELEKTRO

2. WABOT-1 (1973)

El WABOT-1, creado por parte de cuatro laboratorios del departamento de Ciencia e Ingeniería de la Universidad de Waseda, fue el primer robot antropomorfo a escala desarrollado en el mundo. Consistía en un sistema de control de extremidades, un sistema de visión y un sistema de conversación. El Wabot-1 fue capaz de comunicarse con una persona en japonés, medir distancias y direcciones de objetos usando receptores externos, oídos y ojos artificiales, y una boca artificial. Caminó con sus miembros inferiores y fue capaz de agarrar y transportar objetos con las manos usando sensores táctiles. Se estimaba que el Wabot-1 tenía la facultad de un niño de un año y medio.



Figura 2.15: WABOT-1

3. WABOT-2 (1984)

En el año 1980 los laboratorios que participaron en el proyecto WABOT1 se volvieron a unir de nuevo para iniciar el proyecto WABOT-2. Era capaz de realizar, así como las actividades artísticas, tocar el piano requeriría habilidades humanas como la inteligencia y la destreza. Por lo tanto el WABOT-2 se define como un “robot especialista”, en lugar de un robot versátil como lo fue el WABOT-1.

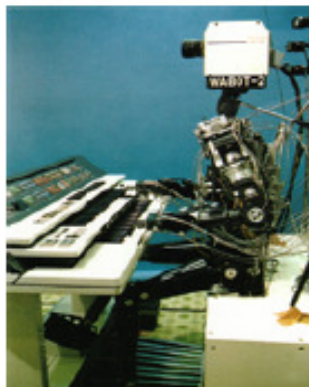


Figura 2.16: WABOT-2

4. E0 (1986)

El E0 fue el primer intento de Honda de crear un robot humanoide que anduviera. Este robot era capaz de andar en línea recta poniendo una pierna después de la otra, sin embargo andaba muy despacio necesitando de cinco segundos entre cada paso.

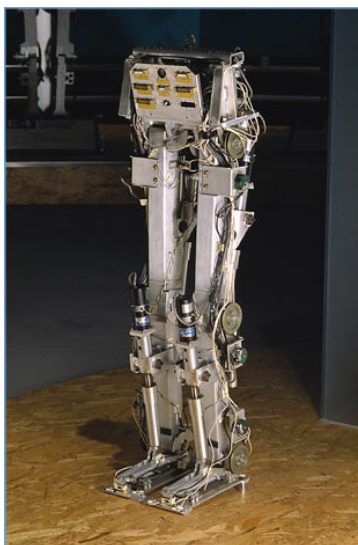


Figura 2.17: E0

5. E1, E2, E3 (1987 - 1991)

El E1 es un prototipo que andaba en un paso estático a 0,25 Km/h con una cierta distinción entre el movimiento de las dos piernas.

El E2 de Honda tuvo el primer movimiento dinámico a 1,2 Km/h, imitando la manera de andar de los humanos.

El E3 logró una velocidad de 3 Km/h sobre superficies planas, pero todavía era necesario realizar el siguiente avance: lograr un paso rápido y estable sobre cualquier tipo de superficie sin que esto implicara la caída del robot. La investigación en los robots de la primera serie E empezó en 1986 y finalizó cinco años después.

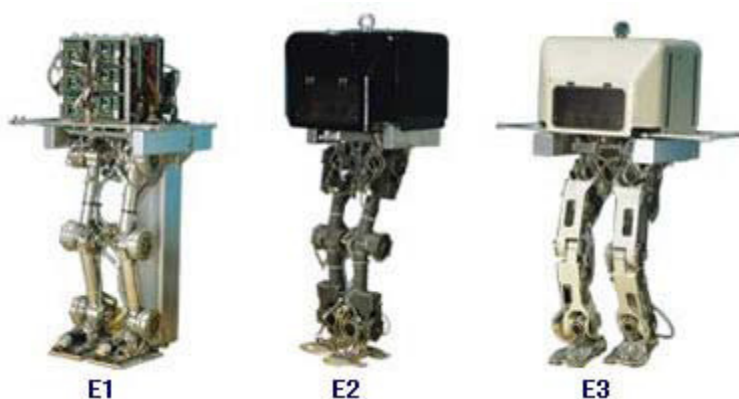


Figura 2.18: E1, E2, E3

6. SHADOW WALKER (1988)

El Shadow Walker fue desarrollado en Reino Unido por el fabricante de robots Shadow Robot Co. Ltd., mide 160 cm, tiene 12 grados de libertad y en su torso están las válvulas de control, electrónica e interfaces con el computador. Su propósito es el de ayudar con la investigación y desarrollo para nuevos diseños y técnicas sobre equilibrio y locomoción humana.



Figura 2.19: Shadow Walker

7. E4, E5, E6 (1991 - 1993)

Entre 1991 y 1993, y una vez que ya se había logrado que los robots fueran capaces de simular la forma de andar humana y caminar a una velocidad similar, Honda desarrolló la tecnología necesaria para que además pudieran controlar el balanceo de su cuerpo y tuvieran la habilidad de avanzar sobre pisos en los que hubiera obstáculos simples.

El E4 fue un prototipo experimental más ligero que sus predecesores que era capaz de desplazarse a 4,7 Km/h, la velocidad que alcanzamos los humanos cuando caminamos a paso ligero. Honda incrementó la longitud de la rodilla a 40 cm para simular la rápida velocidad del paso humano a 4,7 Km/h.

El E5 no introdujo mejoras sustanciales en la forma de desplazarse pero se convirtió en todo un hito al ser el primer modelo autónomo de la compañía japonesa.

Hubo que esperar hasta el E6 para que Honda consiguiera por primera vez que un robot fuera capaz de controlar los balanceos de su cuerpo, cualidad que le permitía subir y bajar escaleras y caminar sobre obstáculos. Consiguió control autónomo del equilibrio en situaciones en las que el robot subía y bajaba escaleras, rampas o evitaba obstáculos. El siguiente paso una vez logrado esto es unir las piernas al resto del cuerpo y crear un robot humanoide.



Figura 2.20: E4, E5, E6

8. P1, P2, P3 (1993 - 1997)

En 1993 los prototipos de la firma japonesa ya eran capaces de caminar de manera autónoma y de sortear obstáculos simples, por lo que el siguiente objetivo de Honda fue crear robots con aspecto humanoide. Fue entre 1993 y 1997, en una nueva generación que estuvo formada por los modelos P1, P2 y P3.

El P1 fue el primer prototipo con forma humana de Honda. Con una altura de 1,915 m y un peso de 175 Kg, el P1 se convirtió en el primer desarrollo que además de piernas tenía tronco, brazos y una cabeza. Eso supuso un salto cualitativo muy importante, ya que este robot no sólo caminaba, sino que además podía encender y apagar interruptores, agarrar los pomos de las puertas e incluso llevar objetos gracias a sus extremidades superiores. La investigación sobre el P1 comenzó en 1993 y finalizó cuatro años después.

El P2 mejoró mucho desde el punto de vista estético, al mostrar un aspecto humanoide mucho más verosímil que su predecesor, pero sobre todo destacó por ser el primero en no necesitar cables para caminar, subir y bajar escaleras o empujar objetos. El P2 fue el primer robot humanoide bípedo autorregulable del mundo. Su torso contiene un computador, motores, la batería, una radio inalámbrica y otros controles necesarios para permitir el control inalámbrico.

Gracias al uso de la tecnología wireless, este robot de 1,82 m de altura y 210 Kg de peso incorporaba en su espalda una mochila con un ordenador, un motor, una batería y una radio que se encargaban de hacer funcionar al conjunto.

El P3 fue el primer robot humanoide bípedo, imitador de la forma de andar humana, completamente independiente. Fue finalizado en 1997. La altura y peso del P3 se redujeron considerablemente gracias al cambio de los materiales empleados así como el hecho de descentralizar el sistema de control. Su pequeño tamaño lo hace mejor adaptado a los entornos de trabajo humanos.

Con un aspecto más liviano, desenfadado y atractivo, el P3 fue el robot que introdujo la estética ASIMO. Con 1,60 m de altura y 130 Kg, se convirtió en el primer modelo completamente independiente de la serie y permitió a Honda presentar al gran público un prototipo visualmente muy atractivo con el que atrajo la atención de millones de personas.

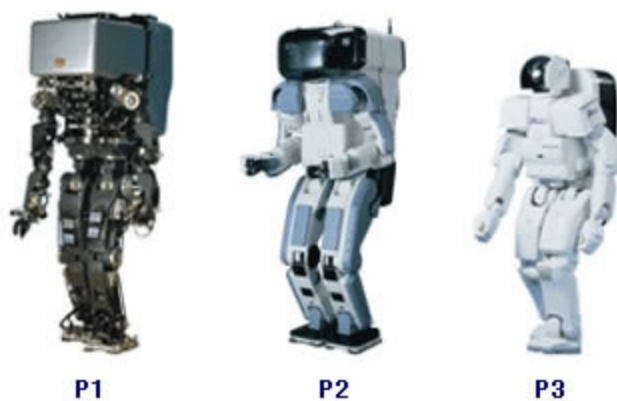


Figura 2.21: P1, P2, P3

9. Hadaly-2 (1997)

Hadaly-2 fue diseñado por la Universidad de Waseda, mide 270cm de altura, pesa 150kg y tiene 53 grados de libertad. Puede reconocer su entorno gracias a su visión, es capaz de conversar debido a su capacidad para generar voz así como reconocerla y se puede comunicar de una manera no sólo vocal sino física. Además, dispone de un imponente sistema motriz, desplazando sus 2,7 metros de altura gracias a sus ruedas.

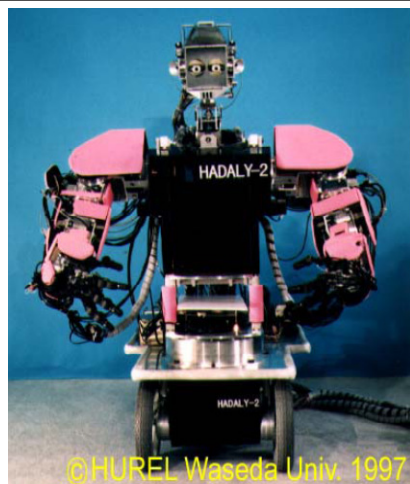


Figura 2.22: Hadaly

9. HRP-1S (1998)

El HRP-1S es similar en forma y tamaño al Honda P3, con 160 cm de altura y 130 kg de peso. Fue el primer robot públicamente demostrado de las series HRP (Humanoid Robotics Projects). Además de la habilidad de andar, posee una sofisticada coordinación de las extremidades superiores lo que le permite utilizar herramientas humanas e incluso operar maquinaria pesada.

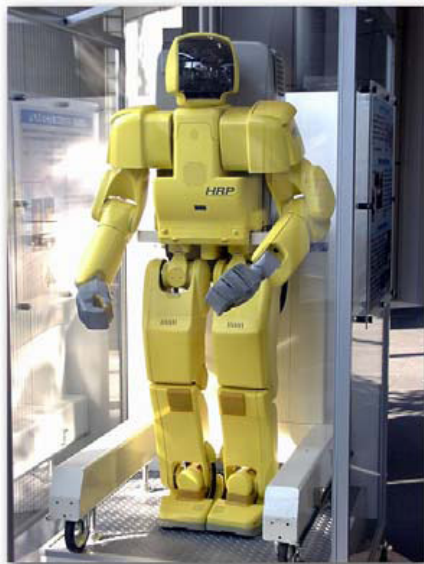


Figura 2.23: HRP-1S

10. SDR-3X (2000)

En Noviembre del año 2000 Sony presentó el SDR-3X. Gracias a la sincronización de movimientos de las 24 uniones de su cuerpo, este robot puede realizar movimientos básicos tales como andar, cambiar de dirección, levantarse, mantener el equilibrio sobre una pierna, golpear una pelota o incluso bailar. El SDR-3X utiliza dos procesadores RISC para “pensar” y controlar el movimiento. Mide 50.8 cm de altura y pesa 7 kg.



Figura 2.24: SDR-3X

11. ASIMO (2000)

En el año 2000 Honda presentó la primera versión del popular ASIMO, un robot que medía sólo 1,2 m de altura y había rebajado su peso hasta los 52 Kg. Era capaz de caminar a 1,6 Km/h, podía permanecer en funcionamiento durante 30 minutos seguidos y sus baterías necesitaban de 4 horas para recargarse por completo.

El nombre ASIMO proviene de Advanced Step in Innovative MObility, es pronunciado "ashimo" en japonés y significa "piernas también". Este menudo robot es el resultado de catorce años de investigación por parte de Honda en la mecánica de la locomoción bípeda.



Figura 2.25: ASIMO

El ASIMO X2 presentado en el año 2002 posee un avanzado sistema de reconocimiento facial añadido a sus capacidades de reconocimiento por voz y gestos. Este avance es el resultado de la colaboración en la investigación con científicos en el Instituto de Robótica CMU.

En Diciembre de 2004 Honda introdujo una nueva versión de ASIMO que además de mejorarlo en su diseño exterior, y aumentar su autonomía, también permitía que ASIMO corriera a 3 Km/h. Otro importante añadido fue la incorporación de pulgares opuestos en sus manos pudiendo así coger objetos además de sentir la fuerza ejercida cuando una persona cogía su mano. Todo esto añadido a la capacidad de ASIMO de navegar en su entorno sin tener que repetidamente reconstruir un mapa interno, distinguir gente de obstáculos, y su habilidad para reconocer voces, caras, y gestos permitieron que ASIMO se acercara mucho a una posible viabilidad comercial.

Los modelos anteriores de ASIMO existen como una muestra de la impresionante capacidad de Honda es sus avances en robótica en esta última década pero no tienen gran utilidad aparte de en presentaciones de entretenimiento o investigación.

En el año 2005 Honda presentó un nuevo ASIMO. Con el mismo tamaño que el prototipo del 2004, pero capaz de caminar a 2,7 Km/h (1,6 Km/h en caso de llevar un objeto de 1 Kg) y correr a 6 Km/h en línea recta y 5 Km/h en círculos. Se crea para aplicaciones profesionales tales como repartir café, entregar mensajes, empujar carritos, etc.

En el año 2007 se consiguió que trabajara en equipo con otros robots como él y que pueda moverse cómodamente entre personas.

Por todo esto es obvio que ASIMO no es un juguete, está desarrollado para ser un ayudante para los humanos. Es decir, para trabajar en casa, ayudar a los ancianos, empujar a personas postradas en silla de ruedas, etc. Por último comentar que la altura de ASIMO es tal que permita establecer una comunicación cara a cara con una persona sentada en una silla, además de poder hacer su trabajo sin parecer demasiado grande y amenazante.

12. H6 (2001) [23]

En el año 2001 la Universidad de Tokio presentó el modelo H6. Se trata de un humanoide de 137 cm de altura y 55 kg de peso, con 35 grados de libertad. Dispone de motores DC para impulsar sus articulaciones, de un PC equipado con dos procesadores y un

sistema operativo RT-Linux. Además dispone de Ethernet para la conexión a la red inalámbrica. Es totalmente autónomo y se puede manejar sin ningún tipo de cables externos.



Figura 2.26: H6

13. SDR- 4X (2002)

El SDR-4X, además del reconocimiento de imágenes, sonido, tecnologías de síntesis de sonido, comunicación y movimiento, la tecnología de control basada en memoria está incluida en este robot para enriquecer la comunicación con los humanos. Este robot puede reconocer a una persona gracias a un procesamiento de imagen de su cara capturadas por Universidad Carlos III de Madrid las cámaras a color, así como la procedencia de un sonido gracias a los siete micrófonos situados en el interior de su cabeza. El hecho de poseer integrada tecnología Wireless en entornos LAN, le permite sincronizar información con un PC de manera remota, con lo cual puede ir actualizando sus capacidades de reconocimiento vocal gracias a la posibilidad de ir añadiendo nuevo vocabulario a su memoria.



Figura 2.27: SDR-4X

14. HRP-2P (2002)

El prototipo HRP-2, alias P-Chan, fue el primer robot de tamaño humano capaz de tumbarse y levantarse de nuevo. Esto lo logra gracias a un torso flexible, análogo a lo visto en los nuevos modelos de ASIMO.



Figura 2.28: HEP-2P

15. HRP-2 (2003)

El HRP-2 incorpora un nuevo sistema de visión 3D llamado VVV (Visión Volumétrica Versátil) que sustituye a la configuración típica de una única cámara en la cabeza por cuatro a color y de precisión. Este hecho no sólo mejora la visión del robot, si no que le permite ver con mucho mayor grado de detalle y ampliar su campo de visión. Además del sistema VVV, se incorporó un sistema láser de medida de distancias lo que permite al HRP-2 construirse un mapa bidimensional en comparación con el Universidad Carlos III de Madrid de la entrada del sistema VVV, pudiendo así rápidamente evitar obstáculos incluso cuándo éstos han sido movidos.



Figura 2.29: HRP-2

16. QRIO (2003)

En septiembre de 2003 Sony presentó a QRIO, el ápice de su proyecto SDR. Este robot incluye una red wireless, capacidad para lanzar pelotas, reconocimiento de cara y voz, visión estereoscópica, la capacidad para evitar obstáculos, dedos independientes totalmente funcionales y mapeo visual. La mayor virtud de QRIO es su extremadamente avanzado sistema de equilibrio que le permite andar por terrenos inestables o tambaleantes. Además si QRIO se cae responde poniendo los brazos para amortiguar la caída tal como lo haría un humano.



Figura 2.30: QRIO

17. Partner (2005)

El PARTNER es capaz de tocar la trompeta, ya que tiene la capacidad de mover sus labios como los de un ser humano. Tiene una estatura de 1.80m de altura, esto le permite cargar a una persona de un lugar a otro que fue el motivo de su creación para ayudar a las personas de la 3ª edad.

Además de todos estos diseños, cabe destacar dos modelos desarrollados por el departamento de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid el Rh-0 y el Rh-1, bajo la financiación de la CICYT (Centro de Investigación Científica y Tecnológica) y dirigidos ambos proyectos por el profesor Carlos Balaguer [24].

Ambos modelos Rh (Robot humanoide) son muy parecidos, con la salvedad del año de fabricación y la incorporación de una carcasa protectora en el modelo Rh-1 que su predecesor el Rh-0 no incorporaba.



Figura 2.31: Partner

18. Rh-1 (2007)

El robot Rh-1 es el segundo robot que hay en Europa, mide menos de un metro y medio y pesa unos 52 kilos. Puede caminar erguido como cualquier ser humano, o cooperar en labores sencillas con personas u otros autómatas. Sus posibles aplicaciones son extensas. Puede interactuar con humanos en multitud de tareas sencillas.

Su sistema de visión artificial y la telemetría láser le permiten analizar el entorno y desplazarse por el mismo.

Esta versión tiene una autonomía de 30 minutos gracias a sus baterías, que alimentan las dos computadoras que RH1 esconde en su interior y que le evitan depender de una unidad de proceso externa.



Figura 2.32: Rh-1

19. MechaDroid Type C3. (2008)

Dicho robot está fabricado y diseñado para trabajar en la recepción de un hotel u otro lugar público. Lo ha desarrollado la firma japonesa "Japan Business Design". Sabe cómo atender a los clientes de un complejo hotelero, de forma que él mismo administra la información sobre las habitaciones, salones y servicios del recinto. Además, puede almacenar la información acerca de sus entradas y salidas. Por otra parte, el robot incorpora un sistema de reconocimiento de caras, que como ocurre con los sistemas de publicidad inteligente, hace que identifique el tipo de persona que quiere alojarse en el hotel para ofrecerle opciones a su gusto.



Figura 2.33: MechaDroid Type C3

20.- NIT Humanoide (2009)

El NIT Humanoide es un robot bípedo del tamaño de un alumno de primaria desarrollado por el Nippon Institute of Technology, en colaboración con Harada.

El robot humanoide se ha diseñado con fines educativos y su tamaño es lo suficientemente alto para que pueda interactuar con su entorno de una manera significativa. Este robot se exhibirá en las escuelas de primaria y secundaria, y su objetivo es mejorar el aprendizaje de los estudiantes mediante la sensibilización sobre el conocimiento de la tecnología de los robots bípedos y su conexión con las matemáticas y la física.

El NIT tiene 125 centímetros de alto y pesa 15 kilogramos, dispone de unos 21 grados de libertad de movimiento y está alimentado por una batería de iones de litio. Está equipado con los sensores habituales: cámaras, acelerómetros, sensores de giro, sensores de

detección de obstáculos, sensores de distancia y sensores piezoeléctricos. Además puede ser controlado a través del PC o del mando a distancia.

Además de las capacidades básicas mencionadas, el NIT Humanoide puede servir como una especie de asistente del maestro, ya que lleva incorporado un proyector que le permite mostrar diagramas en una pizarra, que podría ser difícil de explicar en palabras. El Robot se puede programar con el Microsoft Robotics Studio Developer, que los estudiantes han estado usando para probar los algoritmos de control para el eNuvo Robot Walk, una versión de robot anterior.



Figura 2.34: NIT Humanoide

En esta gama de Robots Bipedos de poco peso y bajo coste, el profesor Ceccarelli y su equipo del Laboratory of Robotics and Mechatronic (LARM) [12], han estado trabajando de una manera continuada en esta línea, primero con el robot bípedo EP-WaR II [13] y últimamente con los diseños de las piernas del humanoide low-cost CALUMA [14]. Con esta premisa en el Grupo MAQLAB y RoboticsLab pertenecientes a la Universidad Carlos III de Madrid, se crea el Pasibot.

El Pasibot es bípedo de un grado de libertad, capaz de emular el movimiento del paso humano, basándose en la combinación y adaptación de mecanismos clásicos: Chebyshev, pantógrafo y sistema de estabilización [15][16].

Con el fin de conocer detalladamente el comportamiento cinemático del Pasibot y de proporcionar los parámetros cinemáticos a los sistemas de control, es necesario desarrollar un modelo paramétrico de la cinemática del bípedo completo, en función del único motor que posee.

El dominio del comportamiento cinemático permitirá realizar variaciones dimensionales en función de las trayectorias y desplazamientos deseados, además permitirá observar la evolución de los parámetros cinemáticos en función el tiempo y de las velocidades de entrada. Posibilitando la detección de mejoras necesarias en el sistema.

Capítulo 3:

Diseño del Pasibot

3.1. DISEÑO DEL PASIBOT

El sistema mecánico del Pasibot se trata de un diseño sencillo y optimizado de un robot bípedo, contando éste únicamente con un grado de libertad.

El material de sus eslabones es Aluminio 2024-T351, aleación elegida por su buena maquinabilidad para uso mecánico, y por su uso en diversos estudios universitarios.

El diseño del Pasibot está basado en dos mecanismos: el Pantógrafo y el Chebyshev.

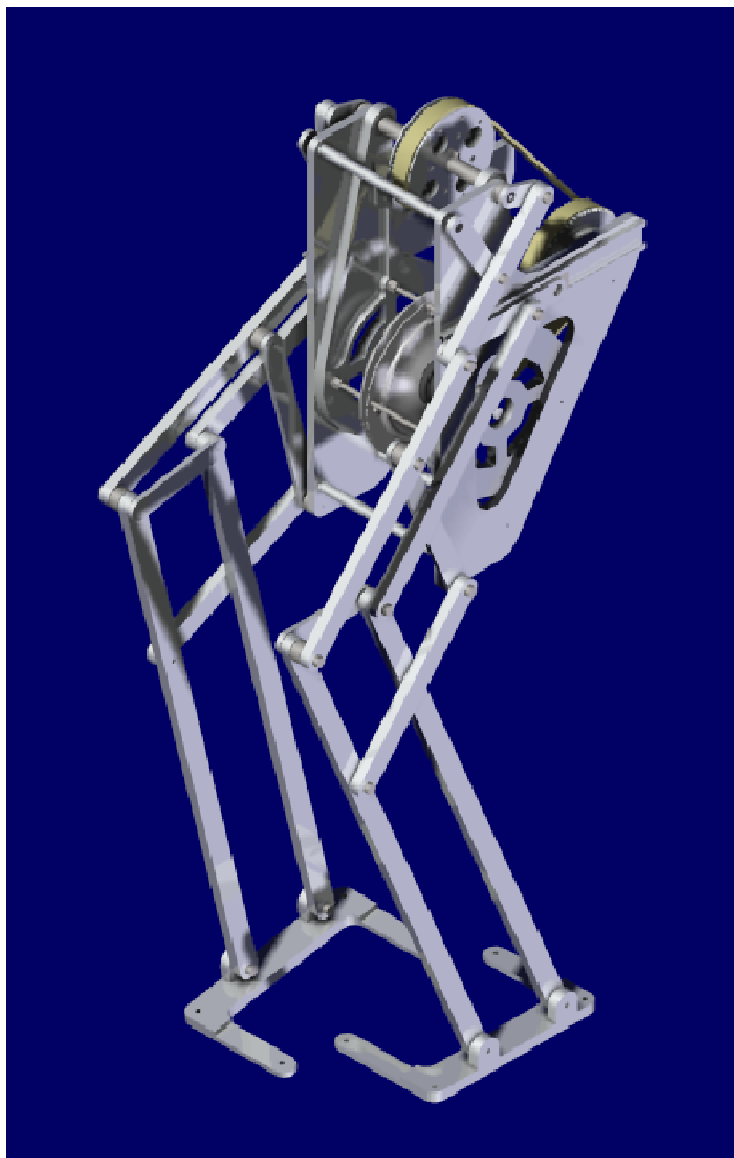


Figura 3.1: Modelo Pasibot

3.1.1 MECANISMO DE CHEBYSHEV O HOEKENS

Con el mecanismo de Chebyshev, se convierte el movimiento circular del motor en la entrada del mecanismo, en un movimiento de tramo casi rectilíneo y curvo en su salida.

Es un mecanismo simple, formado por tres eslabones: manivela motor, biela y balancín. La manivela transmite el movimiento de rotación a un movimiento compuesto en la biela. A continuación se muestra la representación de dicho mecanismo (Figura 3.2):

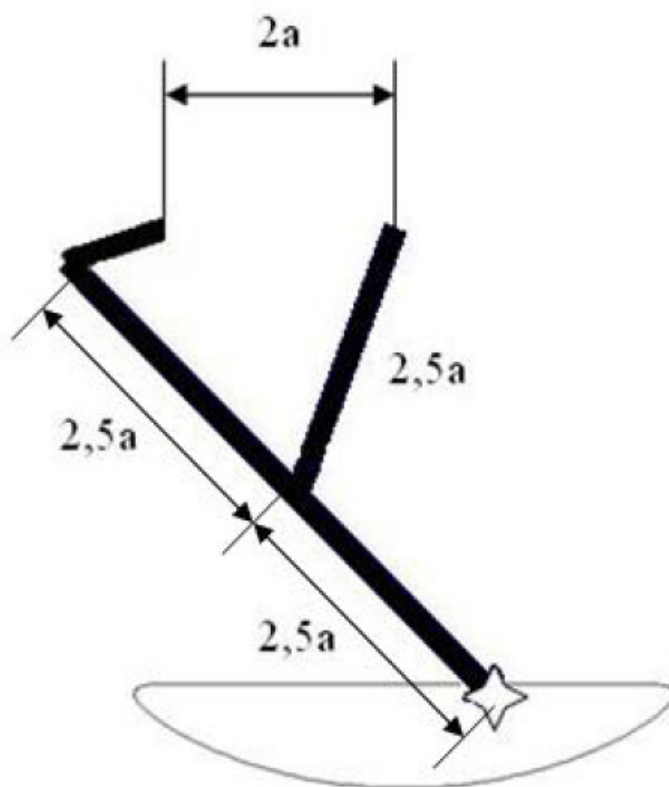


Figura 3.2: Mecanismo de Chebyshev o Hoekens

Éste es el mecanismo principal para que el robot funcione correctamente, debido a que es a partir del mismo donde se empieza a transmitir el movimiento. Con la relación de dimensiones mostradas en la figura anterior, se aprecia cómo el movimiento que le transmite el motor a la manivela es un movimiento de salida de la biela formado por un tramo aproximadamente rectilíneo y otro curvo. El movimiento recto corresponde a cuando un pie del robot está totalmente apoyado en el suelo mientras que el otro pie está realizando

la trayectoria curva que lo desplaza hacia adelante, intercambiándose posteriormente las funciones una vez que dicho pie apoya en el suelo.

3.1.2 MECANISMO DE PANTÓGRAFO

El Pantógrafo es un mecanismo inventado con el fin de reproducir figuras a escala o incluso copiarlas. Se trata de un mecanismo de 5 eslabones y cadena abierta, con 2 grados de libertad. Para ello se varía la distancia entre los puntos de articulación de cada uno de los eslabones, conservando siempre la condición de paralelismo entre ellos dos a dos (Figura 3.3).

Los eslabones que forman el Pantógrafo, se pueden asemejar a la pierna humana, dando así pues al fémur, la tibia y el peroné. Todos ellos están conectados entre si de tal forma que se pueden mover respecto del punto fijo (pivote que une el Chebyshev con el Pantógrafo).

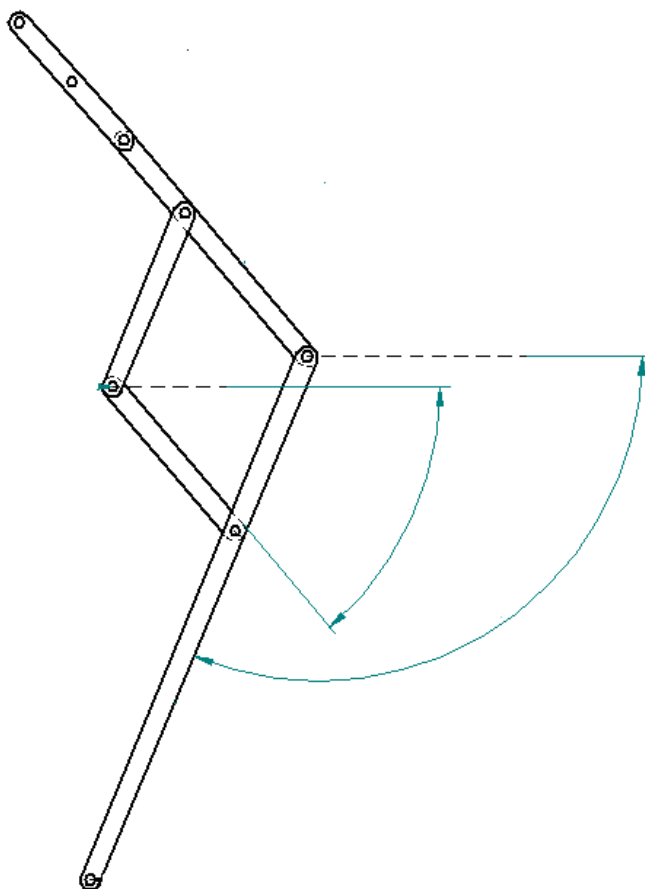


Figura 3.3: Mecanismo de Pantógrafo

Más concretamente, para el modelo simplificado correspondiente a la pata del Pasibot, se consigue aumentar e invertir el movimiento generado por el mecanismo de Chebyshev (Figura 3.4).

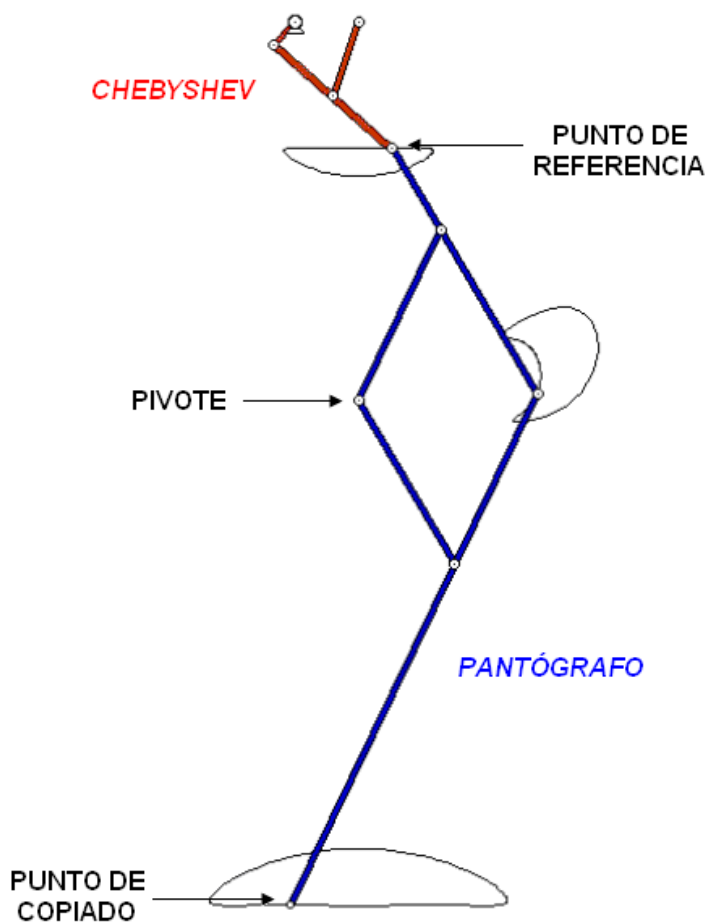


Figura 3.4: Trayectorias de Chebyshev y Pantógrafo

Para la consecución de este trabajo, se parte de un estudio realizado anteriormente. Dicho estudio, consistía en una verificación de las trayectorias de varios puntos del mecanismo (Pasibot) en función de las longitudes de algunas de las barras y de la posición de uno de los apoyos. Para ello, se utilizó el programa Working Model. Dicho programa, es una herramienta de CAE que permite crear simulaciones de sistemas mecánicos reales que permiten reducir el tiempo de creación de un producto, mejorando la calidad final y optimizando los cálculos. Se trata de una herramienta muy útil para los ingenieros para crear y analizar los sistemas mecánicos reales.



Capítulo 4:

Manual de aprendizaje de MSC Adams

4.1. INTRODUCCIÓN

En el siguiente manual se va a proceder a explicar el funcionamiento del programa de simulación MSC.ADAMS 2005 View, la interfaz, las posibilidades de diseño, de simulación, animación y obtención de resultados, todo ello acompañado de un ejemplo explicativo de la construcción del PASIBOT.

El programa MSC.ADAMS View es un programa de simulación en tres dimensiones orientado hacia la simulación de mecanismos. Su mayor virtud es, una vez simulado el modelo, la obtención directa de todo tipo de resultados, de una manera directa y muy fiable.

Una vez iniciado el programa MSC.ADAMS view, aparecerá el siguiente menú de inicio:

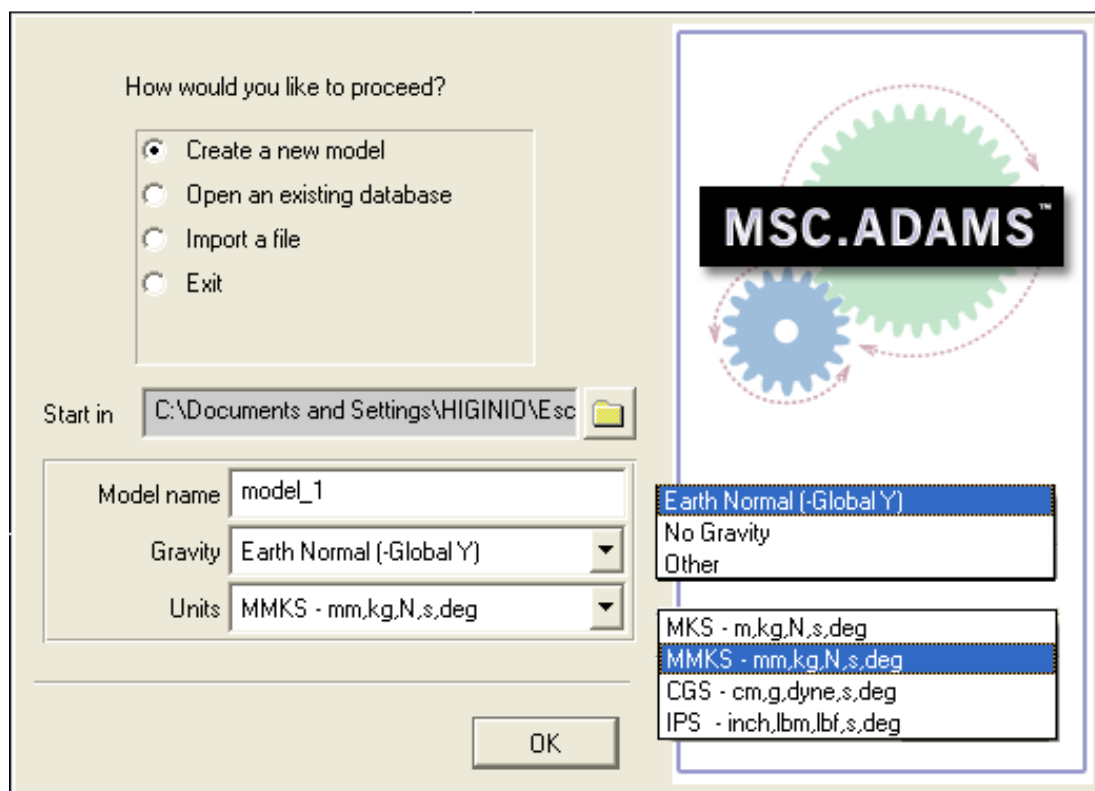


Figura 4.1: Menú de inicio

En ella se podrá definir iniciar un nuevo modelo, abrir una base de datos ya existente, es decir, abrir un modelo guardado anteriormente, importar un archivo o salir del programa. Además se podrá definir la carpeta en la cual se guardarán por defecto las bases de datos creadas. Se podrá también definir el nombre del archivo, si se desea dar gravedad,

por defecto la de la Tierra, así como el sistema de unidades, muy importante para diseñar y para la obtención de resultados, MMKS por defecto.

4.2. CONTROLES BÁSICOS

Si se inicia un modelo nuevo, aparecerá el espacio de trabajo, con la barra de tareas básica (figura 4.3):

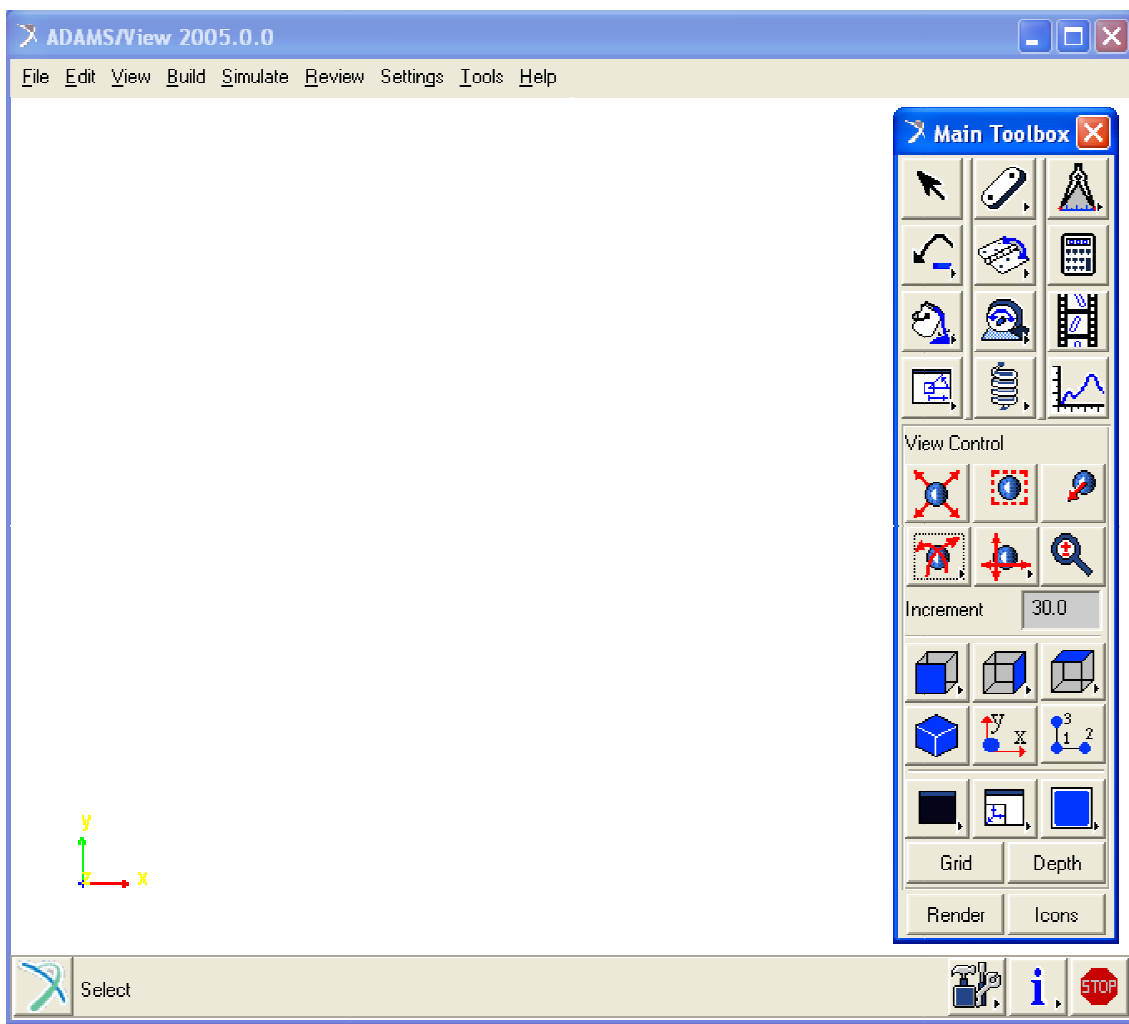


Figura 4.2: Espacio de trabajo y barra de tareas.

En la parte superior aparecen las opciones clásicas de FILE, para guardar, cargar, exportar, etc.; SETTINGS, donde se podrán configurar las unidades de trabajo, modificar la gravedad, la malla para diseñar y otras opciones y HELP, donde se podrán hacer consultas de sobre dudas. En EDIT, VIEW, BUILD, SIMULATE, REVIEW y TOOLS se podrán acceder a ellos de una forma básica a través de la barra de tareas ó del botón derecho del ratón.

El espacio de trabajo por defecto está situado en el plano X-Y, en $Z=0$, con el eje Z saliendo del plano de trabajo. La gravedad sigue la dirección del eje Y en sentido negativo.

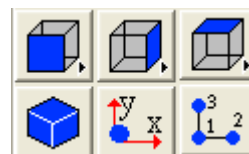
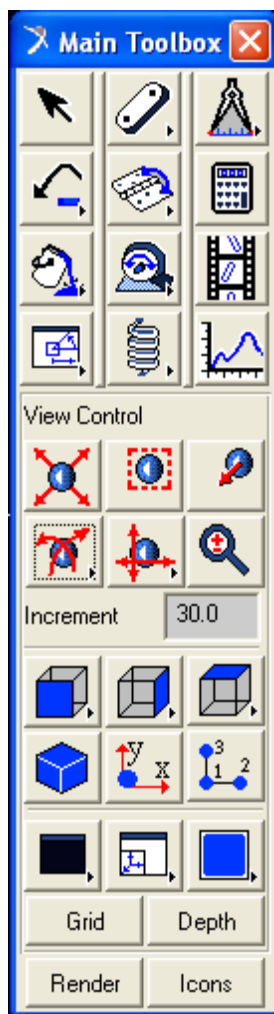
A continuación se procederá a explicar la barra de tareas con sus funciones elementales:

Ésta es la barra de tareas que aparece por defecto, que es la

misma que si se pulsa el cursor:



Las opciones para generar diferentes vistas del modelo son:



Con las primeras opciones, de izquierda a derecha y de arriba a abajo se puede encuadrar, dar zoom a una determinada zona, moverse a un punto determinado, girar o rotar en el plano, desplazarse en el plano y dar zoom. Hay que aclarar que los iconos con una flecha en la parte inferior derecha son desplegables con más opciones. Si hacemos doble clic sobre cualquiera de ellas, tendremos un uso múltiple de cada una de las opciones hasta que pinchemos sobre el botón derecho, lo cual hará que deje de estar activo el botón.

Figura 4.3: Barra de tareas

Con las segundas se podrá variar el plano de trabajo, frontal o posterior, izquierda o derecha, superior o inferior o en isométrico. Además se podrá situar el plano de trabajo en un cuerpo según sus ejes X-Y ó alinear el plano por tres puntos.



Con estos tres iconos se podrá modificar el color del fondo de trabajo, dividir la pantalla o dar más opciones.

Por último, con los cuatro últimos iconos se podrán realizar las siguientes funciones:

- GRID: Se activa o desactiva la malla de trabajo.
- DEPTH: Se cambia la perspectiva de la profundidad.
- RENDER: Se renderizan los elementos.
- ICONS: Rehacen visibles o no los iconos en los elementos.

4.3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Para diseñar los elementos se utilizara el siguiente desplegable:



Las operaciones que se muestran a continuación son las básicas para el diseño en MSC.ADAMS View. Se dividirán en cuatro grupos, y se explicaran los más importantes. En primer lugar están las operaciones de diseño y construcción (puntos, líneas y marcadores). En segundo lugar las operaciones básicas de diseño de sólidos rígidos; en tercer lugar las operaciones booleanas para combinar piezas y por último las operaciones para modificar piezas. Hay que destacar, que existe un menú de diseño que se puede dejar fijo

si se pulsa el icono



Figura 4.4: Barra de tareas de diseño.

siendo el menú siguiente:

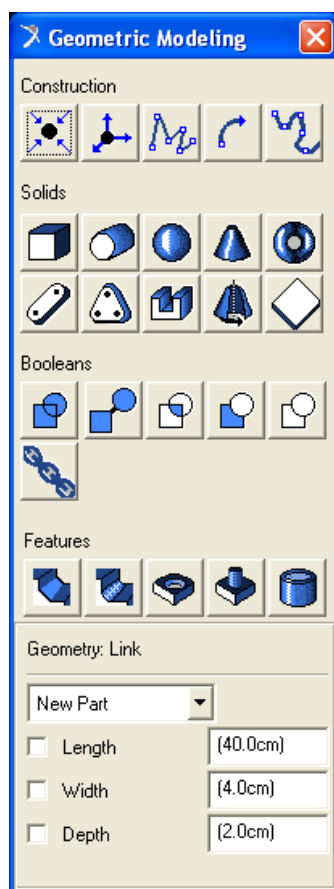


Figura 4.5: Menú de diseño

A la hora de diseñar hay que tener en cuenta que por defecto se hará en el plano X-Y con $Z=0$ y que posiblemente la malla estará activada. Esto implica que si se quiere diseñar directamente sobre el plano de trabajo todos los elementos estarán situados sobre los puntos de la malla, con el grado de imprecisión que puede implicar. Por

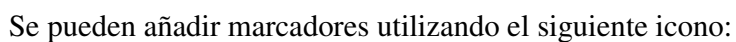


ello, conviene utilizar los puntos para definir la situación de los elementos. Los puntos, por defecto se añadirán al suelo, no a las piezas.

Se puede editar una tabla con los puntos en coordenadas cartesianas si se utiliza POINT TABLE. Para generar una tabla de puntos primero se crearán (CREATE) los puntos, luego se modificarán las coordenadas (coordenadas en azul) y por último se dará a APPLY para que surjan efecto los cambios. Siempre se podrán modificar o añadir más puntos en el momento que se desee.



A continuación se explicarán los marcadores (MARKERS). Los marcadores son puntos de referencia que aparecen en las piezas, normalmente en su centro de masas (Marker: cm) y en sus puntos más significativos, como sus extremos. Son utilizados principalmente para dar posición a una pieza nueva respecto de otra que ya existe, para realizar medidas, para posicionar juntas, motores y para desplazar o rotar piezas utilizándolos como referencia.



Los marcadores por defecto se añaden al suelo, porque si se quieren añadir a piezas primero se debe cambiar en el desplegable de “Add to Ground” a “Add to Part”.

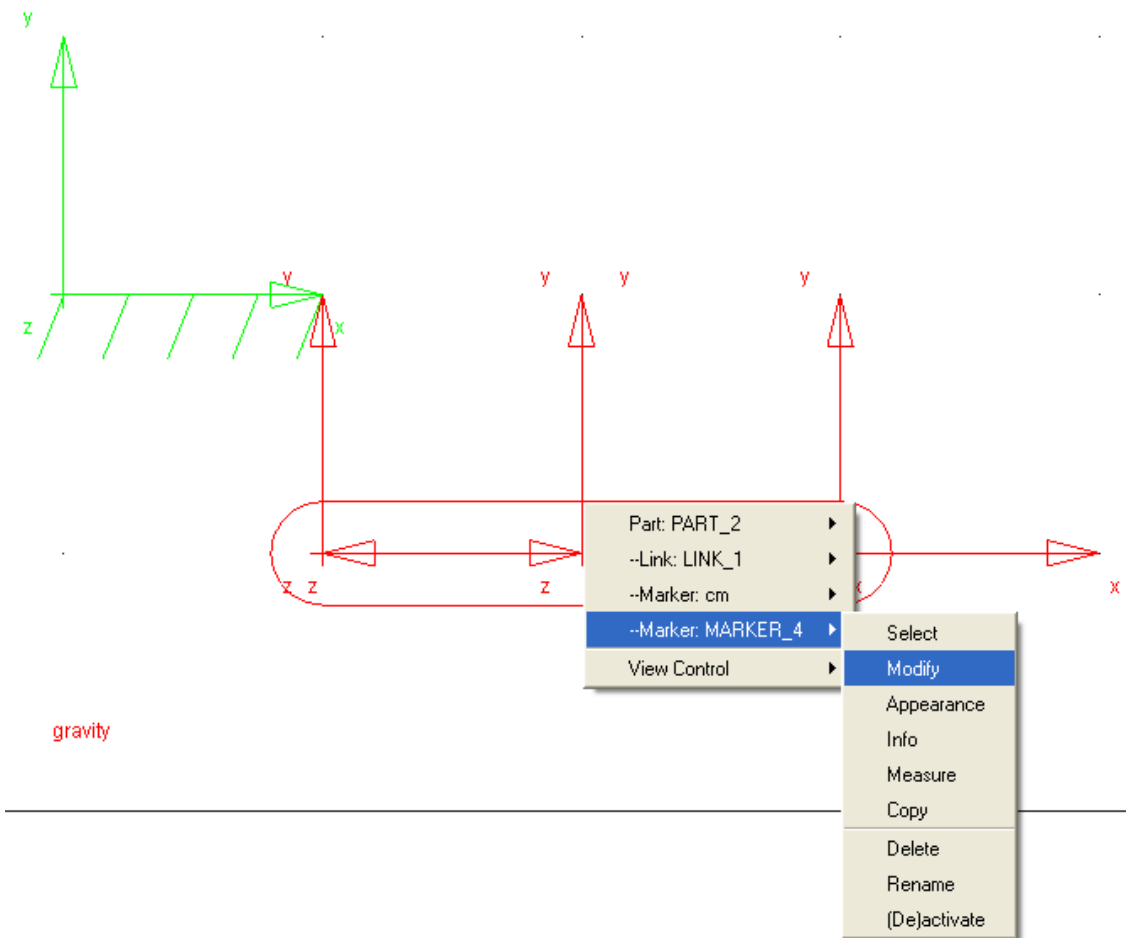
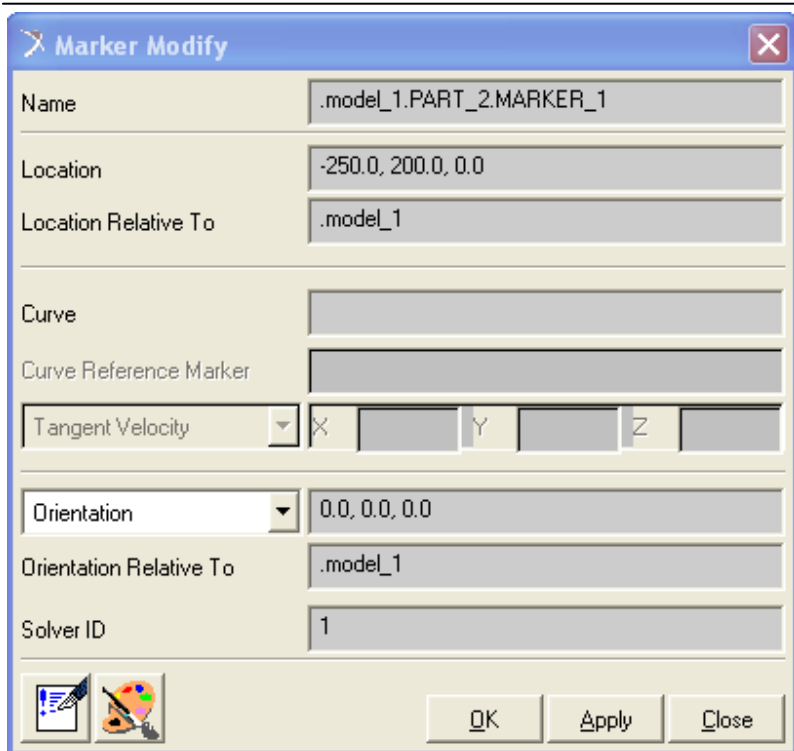


Figura 4.8: MARKERS.

En la figura 4.8 aparecen un marcador en el suelo (verde) y un eslabón con sus tres markers más representativos. También se aprovechará a explicar cómo modificarlos. Si se pincha con el botón derecho en una zona del espacio de trabajo, aparecerá un desplegable con los elementos más cercanos, en éste caso PART_2 (elemento 2). Dentro de PART_2 aparece LINK_1, refiriéndose al eslabón y MARKER_4, el cuál ha sido añadido previamente. En MARKER_4 si se pincha en modificar (modify) aparecerá el cuadro de diálogo siguiente:



The dialog box 'Marker Modify' contains the following fields and controls:

- Name:** .model_1.PART_2.MARKER_1
- Location:** -250.0, 200.0, 0.0
- Location Relative To:** .model_1
- Curve:** (empty field)
- Curve Reference Marker:** (empty field)
- Tangent Velocity:** A dropdown menu showing 'X', 'Y', and 'Z' options.
- Orientation:** A dropdown menu showing '0.0, 0.0, 0.0'.
- Orientation Relative To:** .model_1
- Solver ID:** 1
- Buttons:** OK, Apply, Close

Donde se podrá reubicar dando las nuevas coordenadas ó el giro respecto a los ejes que se quiera. Reseñar que las coordenadas son GLOBALES, no locales respecto al elemento.

Figura 4.9: Cuadro de diálogo de MARKERS

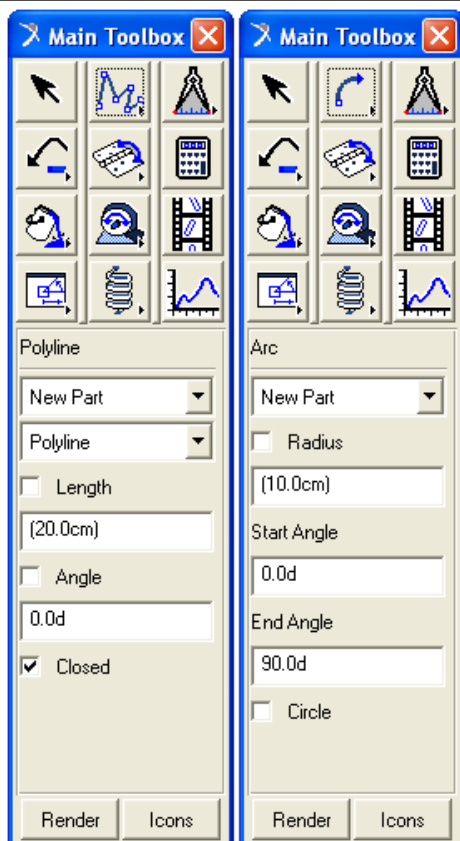


Figura 4.10: Tipos de líneas.

Las líneas carecen de masa, y se pueden utilizar, por ejemplo, para generar posteriormente extrusiones. La primera se utiliza para líneas rectas, la segunda para generar arcos y la tercera para líneas curvas. Se generará la línea dándole la forma que se desee utilizando el botón izquierdo del ratón, finalizando la operación pulsando el botón derecho. Una aplicación importante, y que también se utiliza en otros muchos elementos y piezas, es la posibilidad de preestablecer las dimensiones.

Por último se explicará brevemente las líneas:



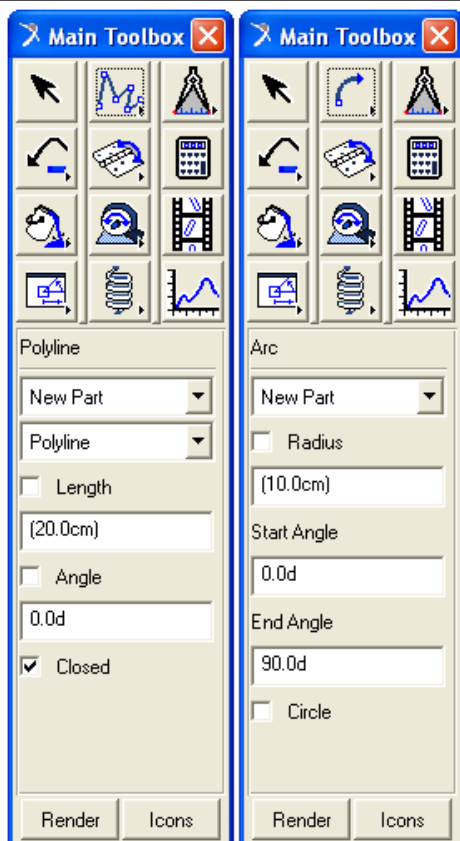


Figura 4.10: Tipos de líneas.

Las líneas carecen de masa, y se pueden utilizar, por ejemplo, para generar posteriormente extrusiones. La primera se utiliza para líneas rectas, la segunda para generar arcos y la tercera para líneas curvas. Se generará la línea dándole la forma que se desee utilizando el botón izquierdo del ratón, finalizando la operación pulsando el botón derecho. Una aplicación importante, y que también se utiliza en otros muchos elementos y piezas, es la posibilidad de preestablecer las dimensiones.

4.3.1. DISEÑO DE SÓLIDOS

Los sólidos que podemos diseñar son los siguientes:



Como en el caso de las líneas, se podrán preestablecer las dimensiones de los sólidos. En caso de que no se pueda establecer la orientación durante el diseño del sólido, ésta será siempre perpendicular a la malla y situada sobre ella en el caso de que esté activada, y perpendicular a la vista del espacio de trabajo en el caso de que esté desactivada.

Se explicarán a continuación:



PARALELEPÍPEDO: Primero se dimensiona la base y se extruye (profundidad “deep”). Se extruye sólo en una dirección.



CILINDRO: Se dimensiona de perfil y se le da la orientación deseada. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



ESFERA: Se define el centro. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



CONO: Se dimensiona de perfil. Es recomendable predefinir sus dimensiones. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



TOROIDE: Se define el centro. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



ESLABÓN: Se define su longitud entre centros de redondeo de los extremos. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



PLACA: Tiene las esquinas redondeadas. Se define su forma mediante una línea con el botón izquierdo del ratón, cuando se desee finalizar se pulsará el botón derecho. La placa se define entre los centros de redondeo de las esquinas. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



EXTRUSIÓN: Se define la forma mediante una línea ya creada o definiéndola con el ratón. Se extruye sólo en una dirección, por lo que debe ser definida.



SOLIDO DE REVOLUCIÓN: Se define el eje de revolución y el perfil de revolución. La extrusión es simétrica a ambos lados del plano de trabajo.



PLACA: Se define como el paralelepípedo, pero ni se extruye ni tiene masa.

4.3.2. OPERACIONES BOOLEANAS

Las operaciones booleanas se utilizan para combinar sólidos rígidos. A continuación se explicarán las más importantes:



UNIR: Fusiona dos sólidos de manera que se transforma en uno sólo. Las dimensiones de los sólidos que lo componen no se pueden modificar.



PEGAR: Une dos sólidos manteniendo las posiciones uno respecto de otro. Las dimensiones de los sólidos sí se pueden modificar.



INTERSECTAR: Al aplicar esta función el sólido resultante es la intersección de los dos sólidos definidos.



CORTAR: El sólido elegido en primer lugar es cortado por el elegido en segundo lugar, desapareciendo entonces el segundo sólido.

4.3.3. MODIFICACIÓN DE SÓLIDOS

Las operaciones siguientes sirven para modificar sólidos rígidos:



CHAFLÁN: Genera un chaflán de 45° con la anchura especificada. Se eligen las aristas con el botón izquierdo del ratón y se finaliza la operación con el derecho.



REDONDEO: Genera un redondeo con el radio especificado. Se eligen las aristas con el botón izquierdo del ratón y se finaliza la operación con el derecho.



AGUJERO: Genera un agujero de radio y profundidad especificada en la cara elegida en sentido perpendicular a la misma.



MACHO: Genera un macho a modo de tornillo de radio y longitud especificada en la cara elegida en sentido perpendicular a la misma.



VACIADO: Genera un vaciado en las caras seleccionadas con una anchura de pared especificada.

Los sólidos diseñados por defecto no tendrán contacto entre sí, lo cuál es beneficioso a la hora de diseñar en 2-D, ya que no existirá interferencia entre las piezas.

4.3.4. MODIFICACIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES INICIALES DE LOS SÓLIDOS

Los sólidos diseñados pueden ser modificados normalmente tanto en posición como en dimensiones, pero como se pueda hacer depende de cómo haya sido diseñado.

La posición y las dimensiones pueden ser modificada de de dos maneras, en función de si han sido referidos a puntos o no:

Si han sido añadidos a puntos la posición y las dimensiones deberán ser modificadas reubicando los puntos mediante “Point Table” como ya se explico anteriormente.

Si no han sido referido a puntos la posición y las dimensiones se modifican de las siguientes maneras.

4.3.5. POSICIÓN.

La posición se puede modificar pinchando dos veces con el botón izquierdo del ratón o con el desplegable del botón derecho indicando la parte (PART) y Modify (figura 4.11):

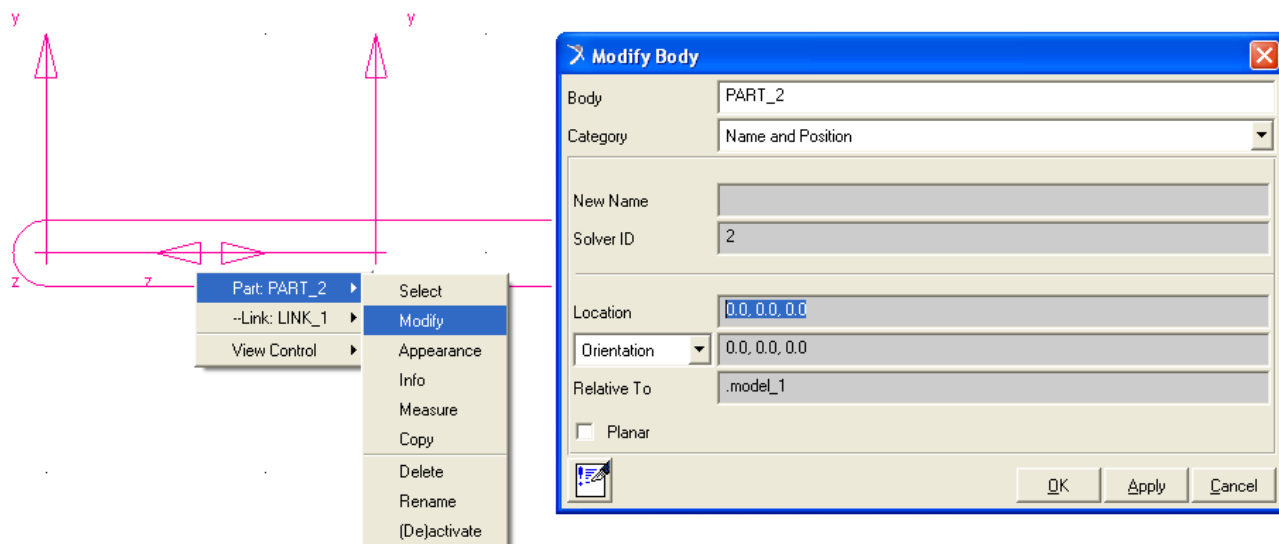
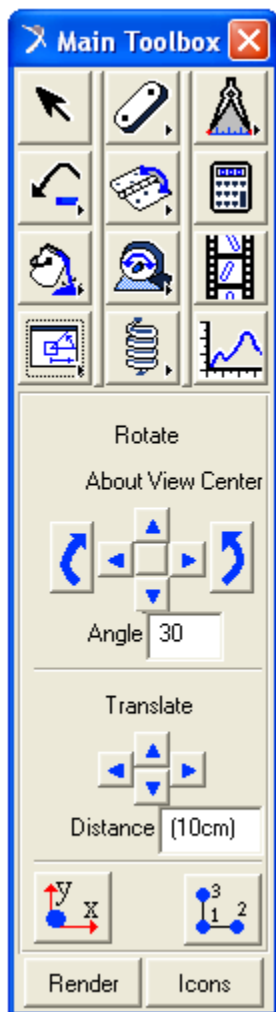



Figura 4.11: Modificación de dimensiones.

E

n “Category” se indica “Name and Position”y se posiciona el centro de masas de la pieza en “Location” teniendo en cuenta de que son coordenadas LOCALES. Además se podrá variar la orientación del sólido en “Orientation”.

Otra forma es utilizando los siguientes iconos:



Si se pincha  en la barra de tareas se transforma en la que aparece a la izquierda. Si se selecciona directamente el sólido que queremos con el cursor se podrá modificar su posición con las opciones que aparecen en la imagen.

Si se abre el desplegable del icono anterior aparecen las siguientes opciones:

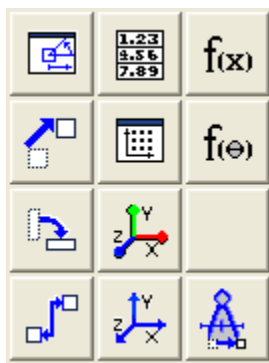


Figura 4.12: Posición de
los sólidos



De las opciones anteriores destacan las siguientes:

TRASLACIÓN: Traslada un sólido desde una posición a otra. Es conveniente utilizar los MARKERS.



ROTACIÓN: Gira un sólido un ángulo prefijado según un eje especificado. Es conveniente utilizar los MARKERS.



ALINEACIÓN: Alinea la cara elegida de un sólido respecto a otra cara seleccionada de otro.

4.3.6. DIMENSIONES

Se modifican con el desplegable del botón derecho e indicando dentro de PART el sólido:

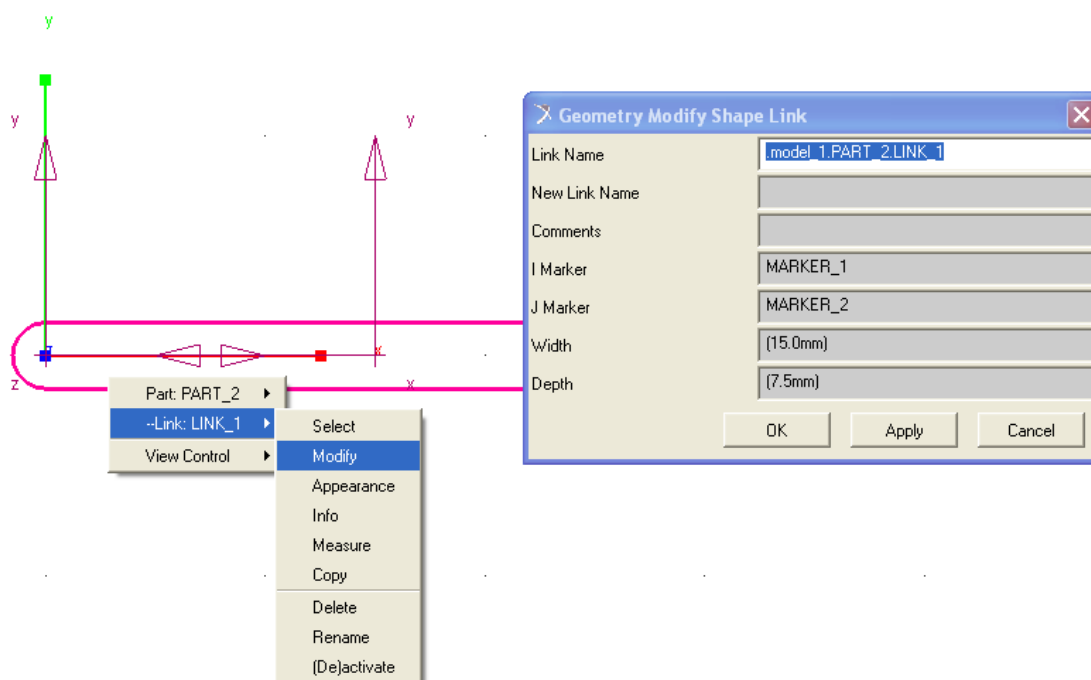


Figura 4.13: Modificación de dimensiones

En ocasiones no se pueden modificar todas las dimensiones, por lo que se eliminará el sólido y se dimensionará de nuevo. Para eliminar un sólido se puede realizar seleccionándolo y pulsando “Ctrl + X” ó con el desplegable del botón derecho y en “Delete”. Si se quieren eliminar varios sólidos se pueden seleccionar utilizando la tecla Ctrl y seleccionándolos con el ratón y utilizando “Delete” del menú “Edit”

Los colores de los sólidos pueden ser modificados utilizando el icono desplegable



Durante el diseño siempre se podrá deshacer una operación errónea con el icono



4.3.7. DISEÑO DE JUNTAS, ACTUADORES Y FUERZAS

Una vez diseñados los sólidos y determinado su posición se procederá a aplicar las juntas y restricciones de movimiento para que el mecanismo se comporte como se desee.

4.3.7.1. JUNTAS

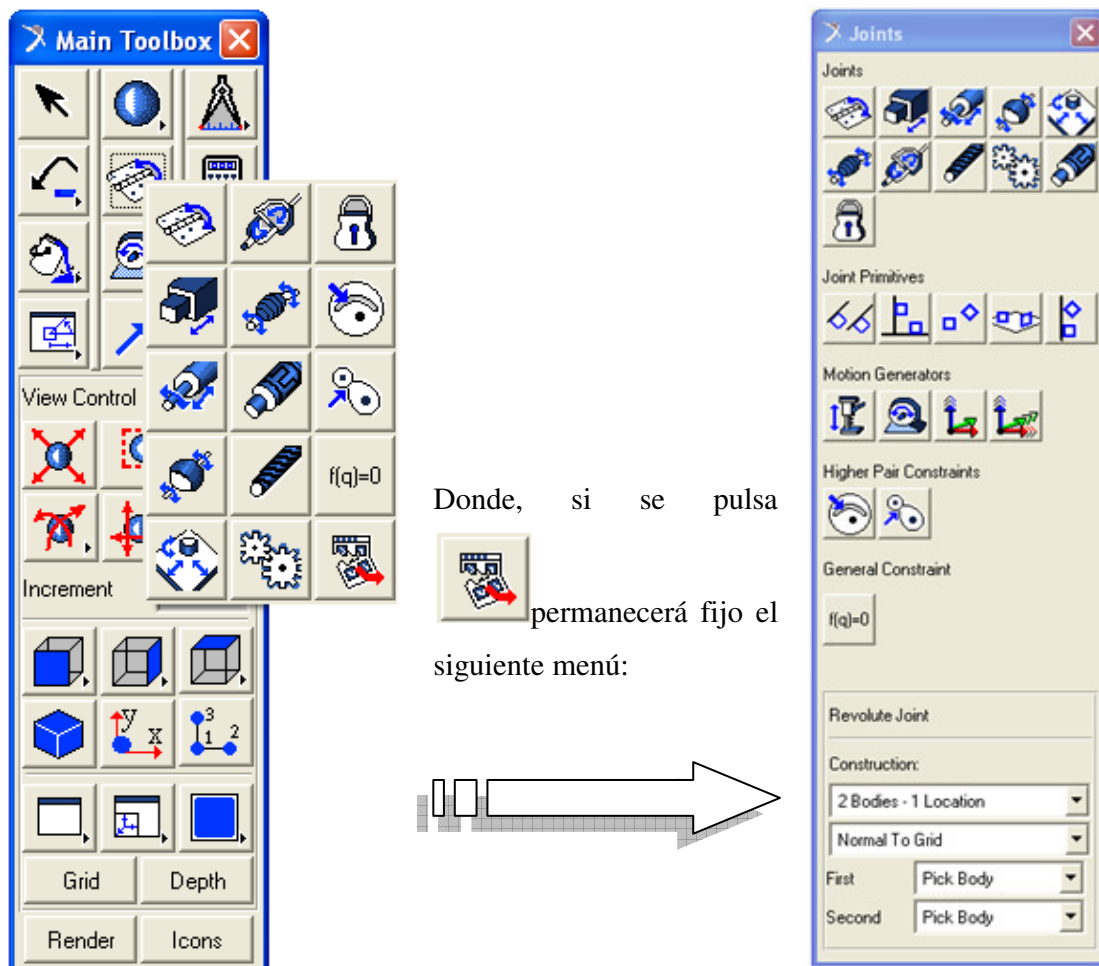


Figura 4.14: Diseño de Juntas

En la barra de tareas se dispone de las siguientes opciones:

Para el diseño de juntas en principio se dejará el menú de construcción tal y como viene por defecto, es decir, dos cuerpos y una localización. La manera de situarlas es elegir con el ratón los sólidos, o un sólido y el suelo (uno a uno) y por último la localización. En ocasiones, debido al número de sólidos, markers, puntos, etc., que hay en una determinada zona se hace difícil elegir lo que se desea, por lo que en esos casos, una vez elegida la junta se pulsará con el botón derecho en la zona donde se quiere situar y aparecerá un cuadro de diálogo como el de la página siguiente:

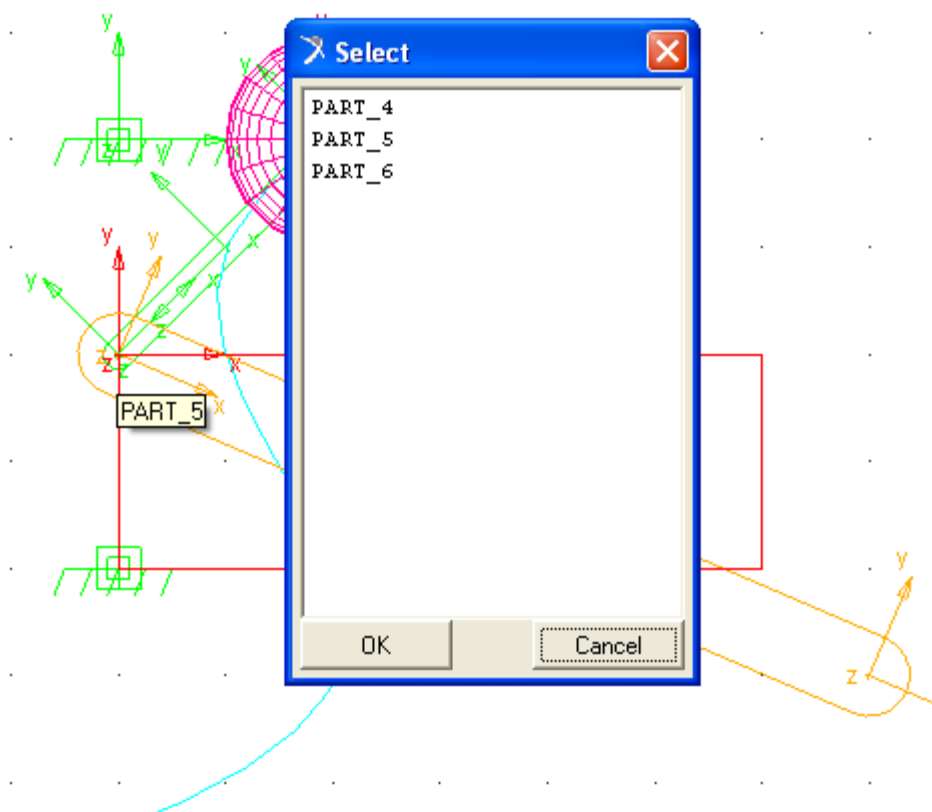


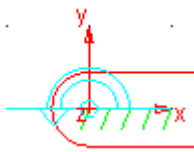
Figura 4.15: Selección de Elementos

donde se podrá seleccionar los sólidos ó elementos de diseño si procediese.

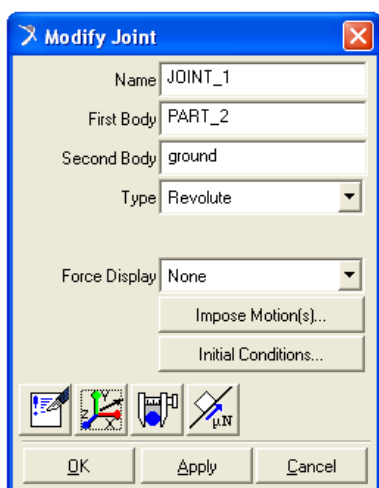
De todas las juntas y restricciones se destacan las siguientes:



JUNTA DE ROTACIÓN:



Restringe el totalmente el movimiento de traslación y la rotación en dos direcciones, permitiendo por tanto la rotación en una sola dirección. La dirección de rotación es, por defecto, normal a la malla, si está activada, o perpendicular a la vista seleccionada en ese momento si está desactivada. Si se desea modificar pulsaremos con el botón derecho en modificar y aparecerá el siguiente menú:



En este menú se podrá redefinir los sólidos que componen la junta, el tipo de junta, si deseamos aplicar una fuerza, realizar medidas, desplazar o girarla o incluso darle fuerza de rozamiento.

Figura 4.16: Menú de modificación de juntas.

Los menús de desplazamientos y de fuerzas de rozamiento son:

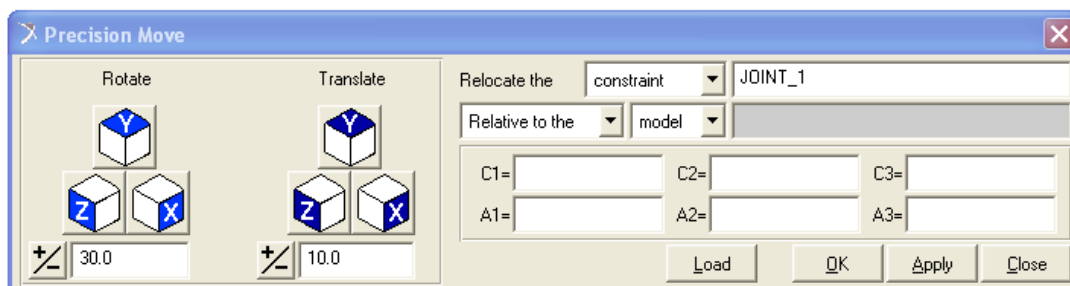
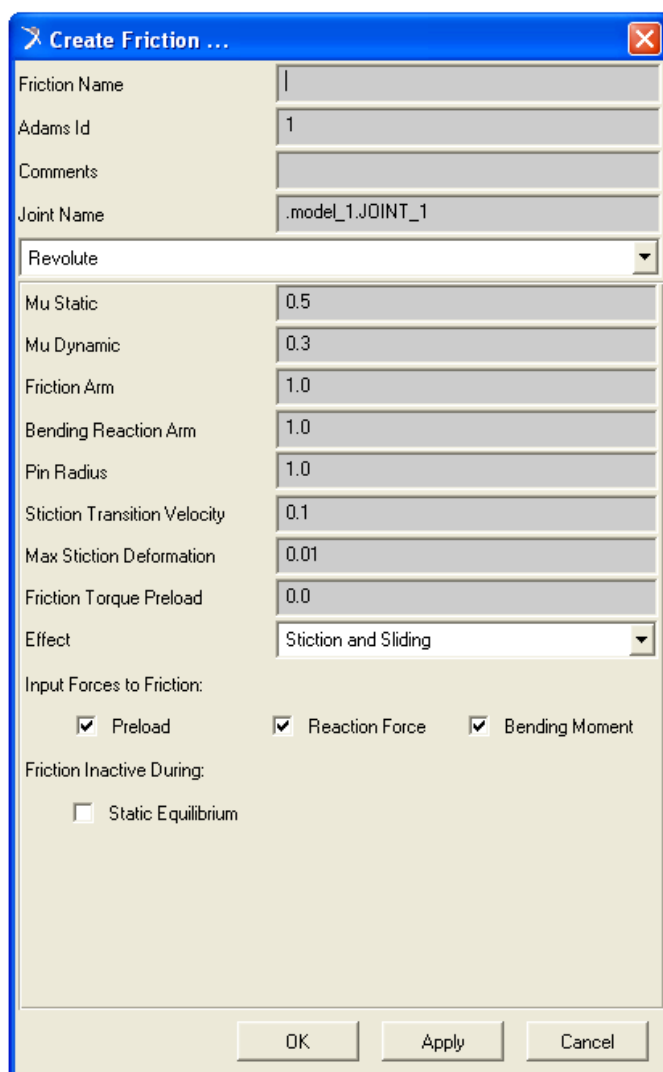


Figura 4.17: Menú de movimientos de precisión de juntas

La principal aplicación de éste menú es la posibilidad de girar juntas en las tres direcciones del plano cuando la dirección especificada no es válida para el diseño.



Por defecto las juntas son ideales, no tienen rozamiento, pero éste se puede definir de la forma que se desee.

Figura 4.18: Definición de juntas



JUNTA DE TRASLACIÓN:

Restringe el movimiento de tal manera que sólo se permite la traslación en una dirección. La dirección de movimiento, una vez seleccionados los sólidos (o el suelo) debe ser especificada. Los menús son iguales que el caso anterior.



JUNTA FIJA:

Restringe el movimiento de tal manera que anula todos los grados de libertad de un sólido respecto de otro o de un sólido respecto al suelo.

Es importante entender que a la hora de diseñar juntas los sólidos no tienen por qué estar en contacto. La junta si ha sido diseñada correctamente no necesita que las piezas estén físicamente en contacto.

4.3.7.2. ACTUADORES

Los actuadores generan movimiento en los sólidos rígidos. Son los siguientes:



MOTOR LINEAL:

Se debe aplicar en una junta de traslación ó cilíndrica. Genera movimiento lineal en una dirección que debemos especificar. La velocidad debe ser especificada antes de ser aplicada o modificada después.



MOTOR ROTATIVO:

Se debe aplicar en una junta de rotación ó esférica. Genera movimiento angular en la dirección de la junta. La velocidad angular debe ser especificada antes de ser aplicada o modificada después.



ACTUADOR LINEAL DE UNA DIRECCIÓN:

Se especifica por defecto entre dos sólidos, o un sólido y el suelo, y con una dirección. La velocidad debe ser especificada antes de ser aplicada o modificada después.



ACTUADOR:

Se especifica entre dos sólidos y la localización. Una vez situada aparece un cuadro de diálogo (figura 4.19) en el que se define el movimiento del actuador.

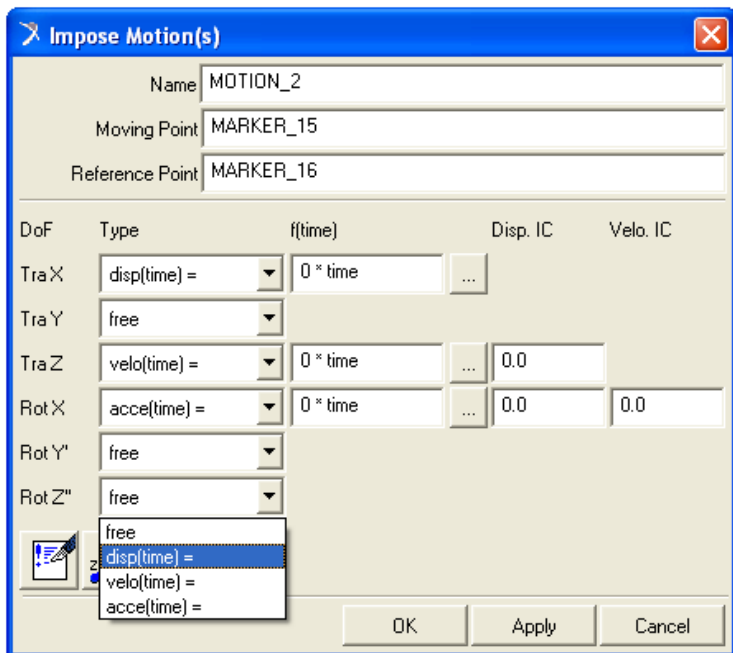



Figura 4.19: Cuadro de Diálogo de actuadores

En ocasiones hay que especificar que los actuadores solo generen movimiento durante un intervalo de tiempo. Esto se puede definir de la siguiente manera:

Lo primero que hay que hacer es pinchar en el actuador y modificarlo:

En el menú del actuador se puede ver dónde está aplicada, el tipo, la dirección, la función de movimiento y si esta es de desplazamiento, velocidad ó aceleración. Por defecto son de traslación, y dependen del tiempo. Si se desea modificar la función para variar el movimiento se puede hacer directamente en el cuadro o pinchar en 

En él se podrá especificar el movimiento de los 6 grados de libertad, si son libres, si tienen aceleración, etc.

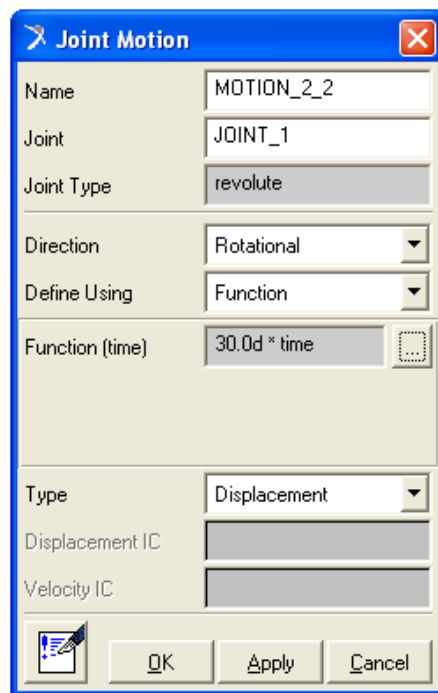


Figura 4.20: Menú de Juntas.

Apareciendo el constructor de funciones de la siguiente página:

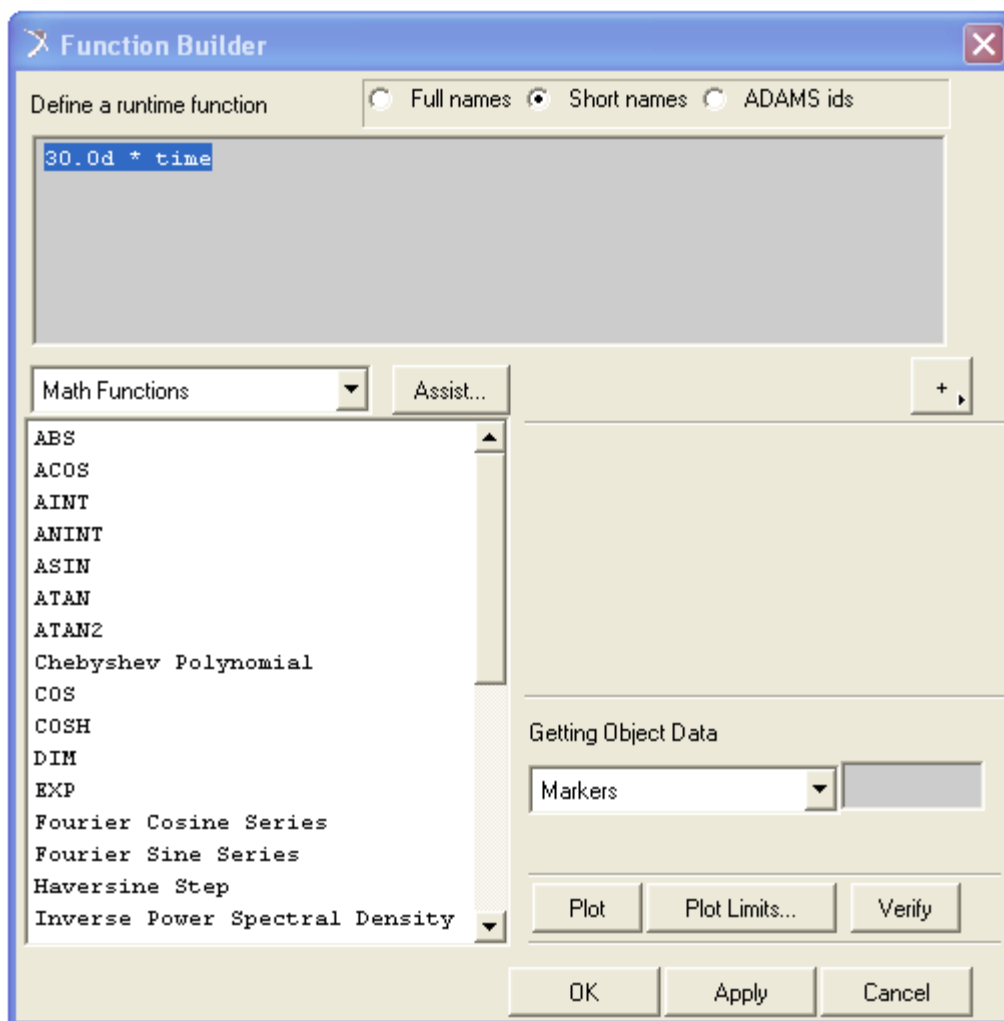


Figura 4.21: Constructor de funciones.

En el constructor de funciones (figura 4.21) se puede ver la función “30.0d * time” donde “d” se refiere a los grados y “time” al tiempo. Si se quiere definir para que el motor solo actúe en un intervalo se utilizará la función “IF”:

IF(time-A:B,C,D) donde:

- A: tiempo para el cual está definida la función
- B: función que debe realizar antes del tiempo A
- C: función que debe realizar durante el tiempo A
- D: función que debe realizar después del tiempo A

Ejemplo: si se desea que sólo actúe la función de desplazamiento “360d*time” en el intervalo (2 , 5.5) se escribirá:

$\text{if}(\text{time}-2:0,0, 360d*(\text{time}-2)) - \text{if}(\text{time}-5.5:0,0, 360d*(\text{time}-5.5))$

El motivo de escribir la segunda función restando es que debe contrarrestar la primera para que solo actúe en el intervalo especificado.

4.3.7.3. FUERZAS

Además de los actuadores, podemos aplicar fuerzas a los sólidos para que se comporten también de una determinada forma. Las fuerzas se aplicarán con el siguiente desplegable:

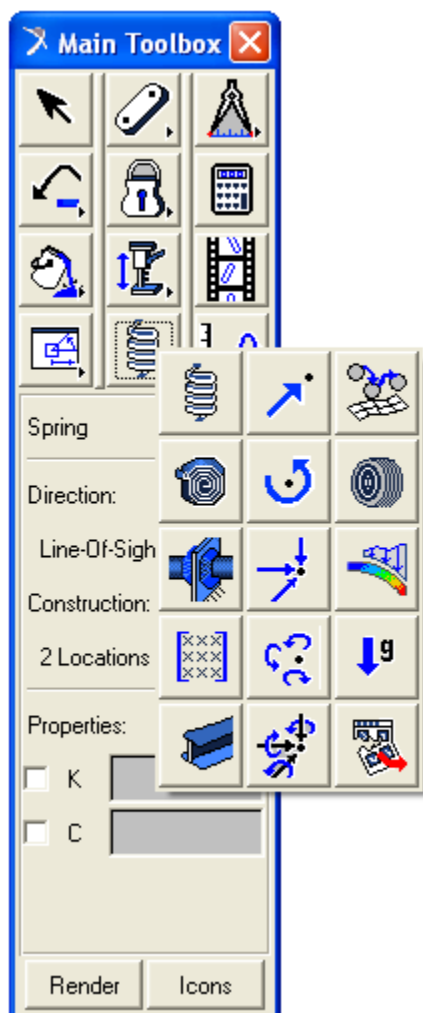


Figura 4.22: Menú de Fuerzas

Se comentará brevemente los más comunes:



Genera una fuerza lineal en un cuerpo en una dirección indicada.



Genera un par de giro en un cuerpo en una dirección dada.



Genera una fuerza de amortiguamiento lineal entre dos sólidos



Genera un par de amortiguamiento entre dos sólidos.



Genera una fuerza extraordinaria, como la gravedad, pero en la dirección que se desee



Una aplicación importantísima es la capacidad de dar contacto:

El contacto se genera entre dos sólidos con el cuadro de diálogo siguiente (figura 4.23):

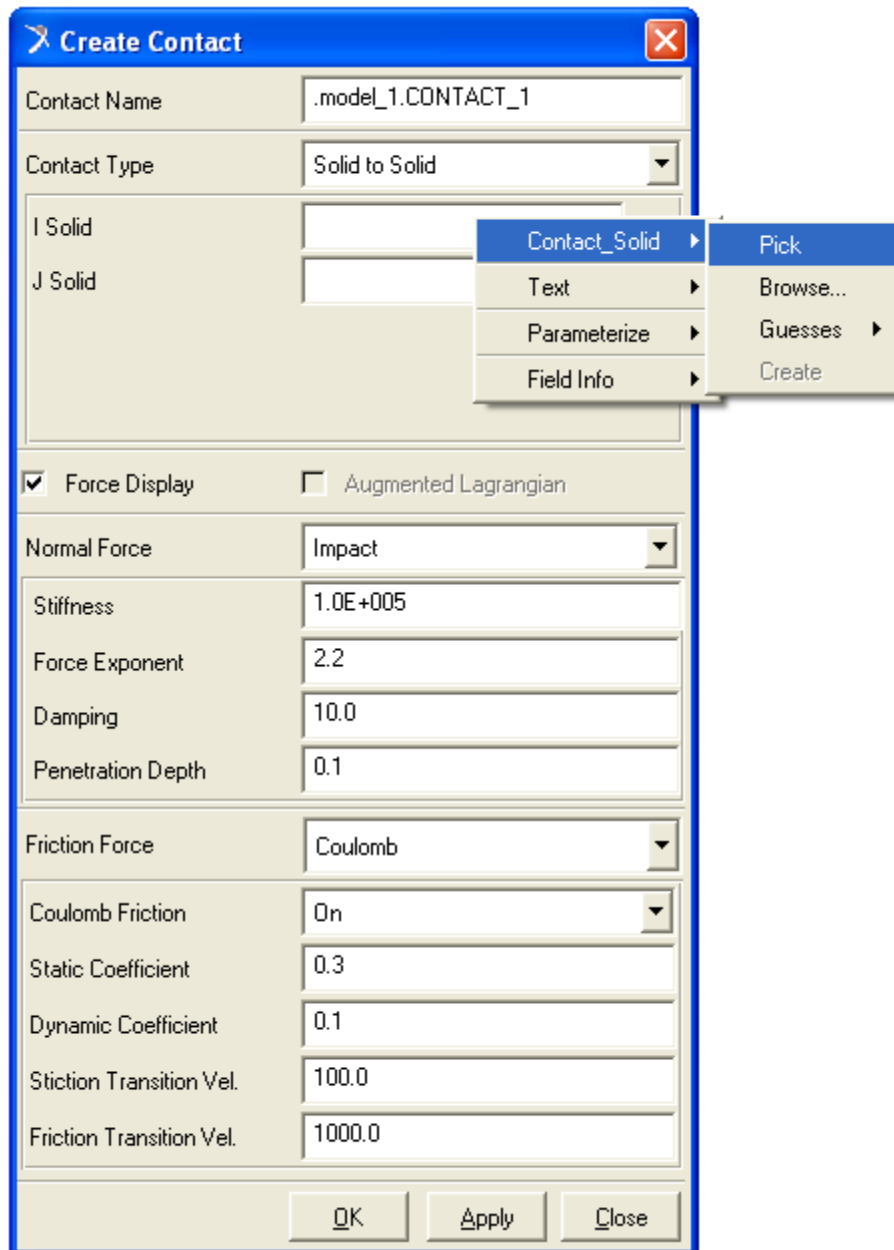



Figura 4.23: Menú de Contactos

Con el botón derecho, siguiendo la imagen de ejemplo, se seleccionará los sólidos en “I solid” y “J solid” que queremos que tengan contacto.

Además se podrá definir el tipo de contacto y si se desea fuerza de rozamiento.

4.4. SIMULACIÓN DEL MODELO

Una vez diseñado el modelo se procede a simularlo. Para

ello se utiliza el siguiente icono,  transformándose la barra de tareas en la que aparece a continuación:

Antes de simular conviene comprobar el equilibrio estático para ver si se ajusta a lo esperado. El equilibrio se comprueba con



Para simular se define el tiempo (duración) y los pasos de la simulación. Para una simulación corta y relativamente fiable con unos 100 pasos por segundo basta. Si se quiere refinar se introducirán entre 500 y 1000 pasos por segundo.

Durante la simulación se aprecian los posibles errores de diseño, de forma que el mecanismo se comporte de forma inesperada o que surjan errores en la simulación y ésta se detenga. Si esto sucede hay que estudiar los posibles errores, resolverlos y volver a simular de nuevo.

Los iconos que tenemos en la simulación son los siguientes:



Figura 4.24: Menú de simulación



Sirve para iniciar la simulación



Sirve para detener la simulación en un momento dado.



Sirve para reiniciar las condiciones iniciales de la simulación. Es imprescindible pulsarlo para volver a simular.



Repita la última simulación realizada.

4.5. ANIMACIÓN DEL MODELO

Una vez simulado el modelo se puede visualizar con 

Quedando la barra de tareas de la manera siguiente:

Con los iconos que aparecen se puede reproducir la animación, parar, reproducir en sentido inverso y reiniciar. Además, si se marca la pestaña “loop” la animación se reiniciará automática e indefinidamente cuando ésta acabe. Si se quiere dar más opciones se puede pulsar visualizando entonces el siguiente menú:

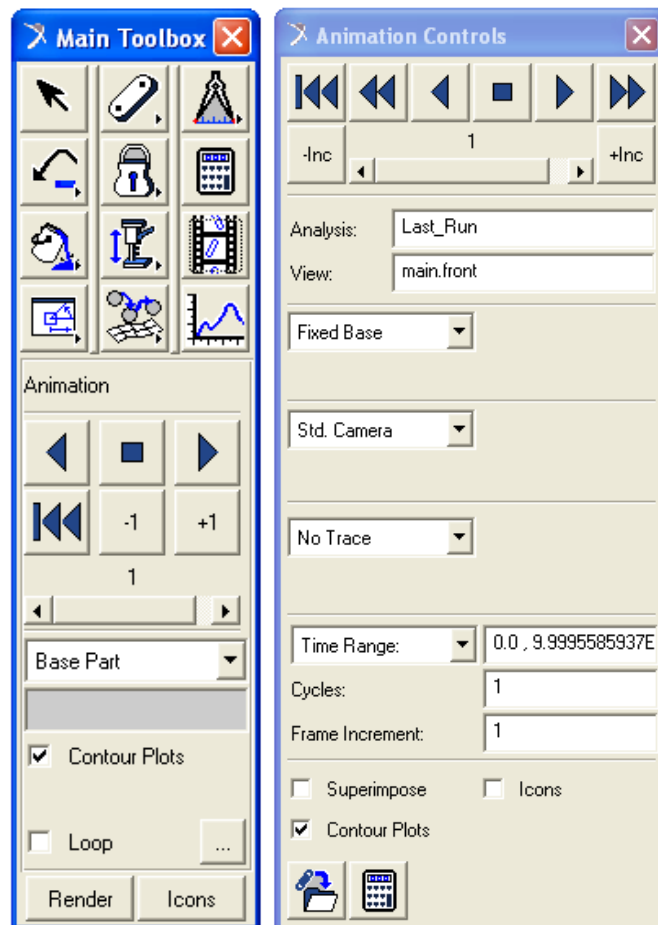


Figura 4.25: Menú de Animación.

Aquí se podrá utilizar una cámara móvil que siga uno de los sólidos o markers, generar una traza que describa el movimiento de un marker, variar el rango del tiempo de reproducción o aumentar la velocidad de reproducción usando “frame increment” con un valor entero mayor que uno.

4.6. TOMA DE MEDIDAS

Para la toma de medidas es imprescindible haber primero simulado.

De una manera elemental se pueden medir ángulos, desplazamientos, velocidades y aceleraciones lineales entre dos sólidos utilizando los iconos que se muestran a la izquierda, apareciendo en el espacio de trabajo un diagrama como el que se muestra continuación:

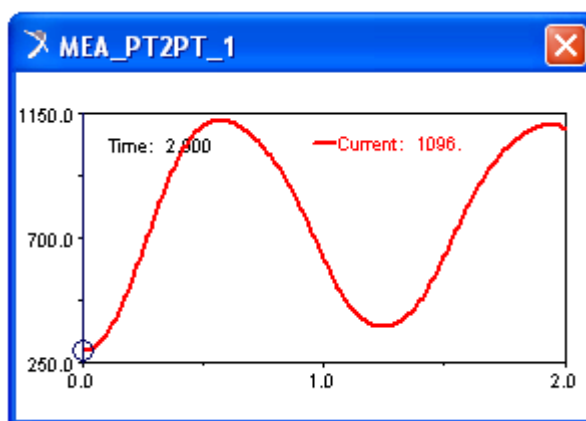
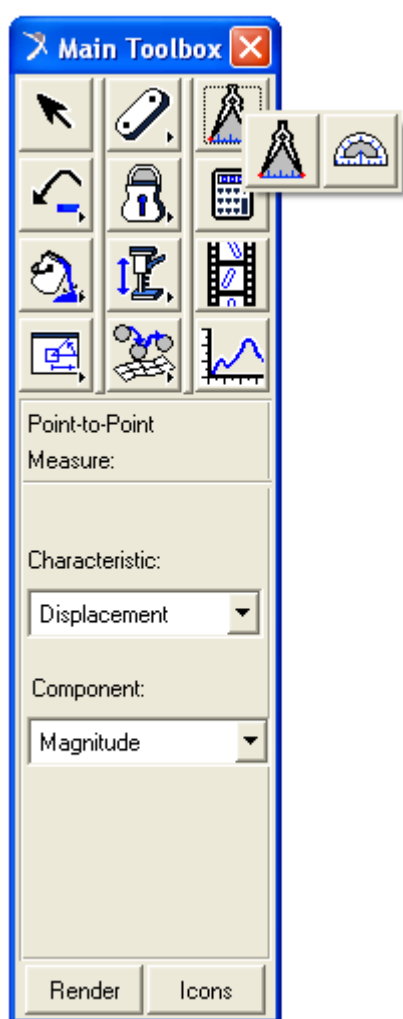


Figura 4.27: Medidas

Otra forma de obtener medidas es utilizar los markers y las juntas para medir directamente sobre ellos. Para ello se seleccionará el marker o la junta, y con el botón derecho se seleccionará “Measure”, mediante el cual se podrá obtener, según el sistema de coordenadas (cartesiano, cilíndrico o esférico) multitud de medidas de diferentes parámetros, como desplazamientos, posición respecto a diferentes ejes, velocidades, aceleraciones, fuerzas, pares de giro, etc.

Figura 4.26: Barra de herramientas de medidas.

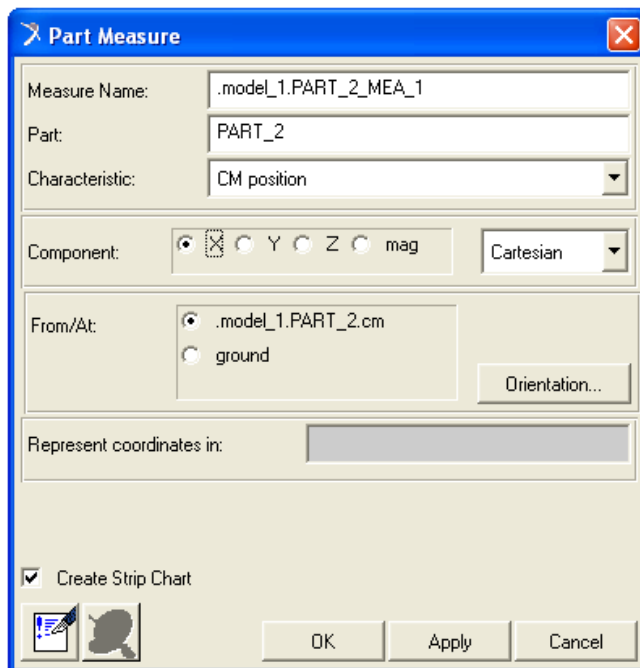


Figura 4.28: Medidas de elementos

4.7. POSTPROCESADOR

Para finalizar esta guía y antes de los ejemplos prácticos se explicará brevemente el postprocesador de datos y como exportar los mismos.

El postprocesador es una herramienta de ADAMS:MSC llamada “ADAMS Postprocessor” que permite un estudio detallado de los resultados que se han obtenido mediante las simulaciones. Además permite visualizar también animaciones para su posterior exportación.

Se puede acceder a él mediante el acceso directo o directamente desde ADAMS View de una manera más cómoda siguiendo los pasos siguientes:



Cuando se toma una medida de cualquier tipo se pulsará sobre ella con el botón derecho y se seleccionará “Transfer To Full Plot” de la siguiente forma:

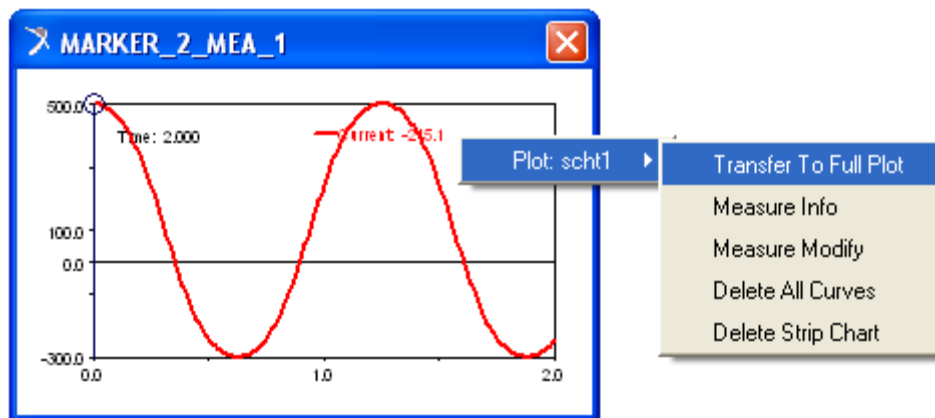


Figura 4.29: Paso de medidas al POSTPROCESADOR.

Una vez hecho se abrirá el postprocesador automáticamente. Todo lo que se guarde de esta forma a partir de ahora quedará guardado en la misma base de datos que estemos utilizando de manera que siempre que esté la base de datos abierta en la que la cual se esté trabajando se podrá acceder directamente al postprocesador pinchando en el siguiente icono de la



barra de tareas: y



de la misma forma se podrá volver a ADAMS View con:

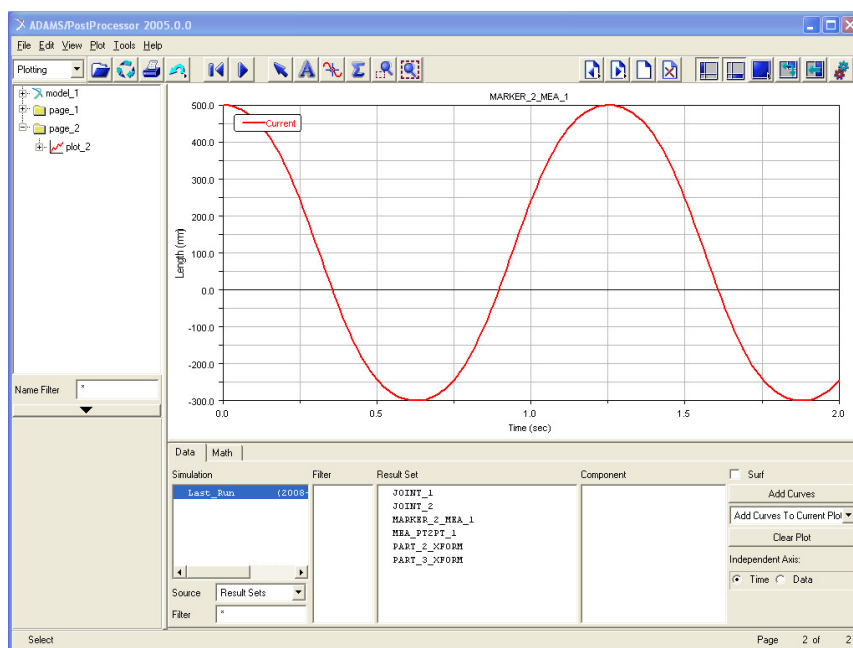


Figura 4.30: Postprocesador.

Para exportar datos se seleccionará en “File” la opción “Export”, “Table”. Entonces aparecerá el siguiente cuadro, donde se definirá el nombre del archivo y la serie de datos

que se desea exportar. Para ello, tal y como se muestra, a continuación se pincha directamente sobre el gráfico.

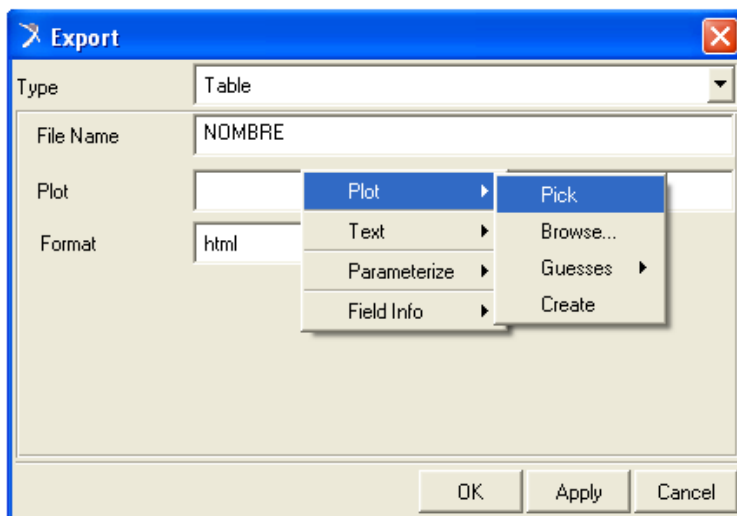


Figura 4.31: Exportación de datos y archivos.

Es importante antes de aceptar, haber elegido una carpeta de destino, que será en principio la que se definió al iniciar el nuevo modelo. Si no se conoce se elegirá en “File”, “Select Directory”.

Para cargar animaciones, se pulsará con el botón derecho en cualquier parte de la gráfica y se seleccionará “Load Animation”, cargándose automáticamente la animación.

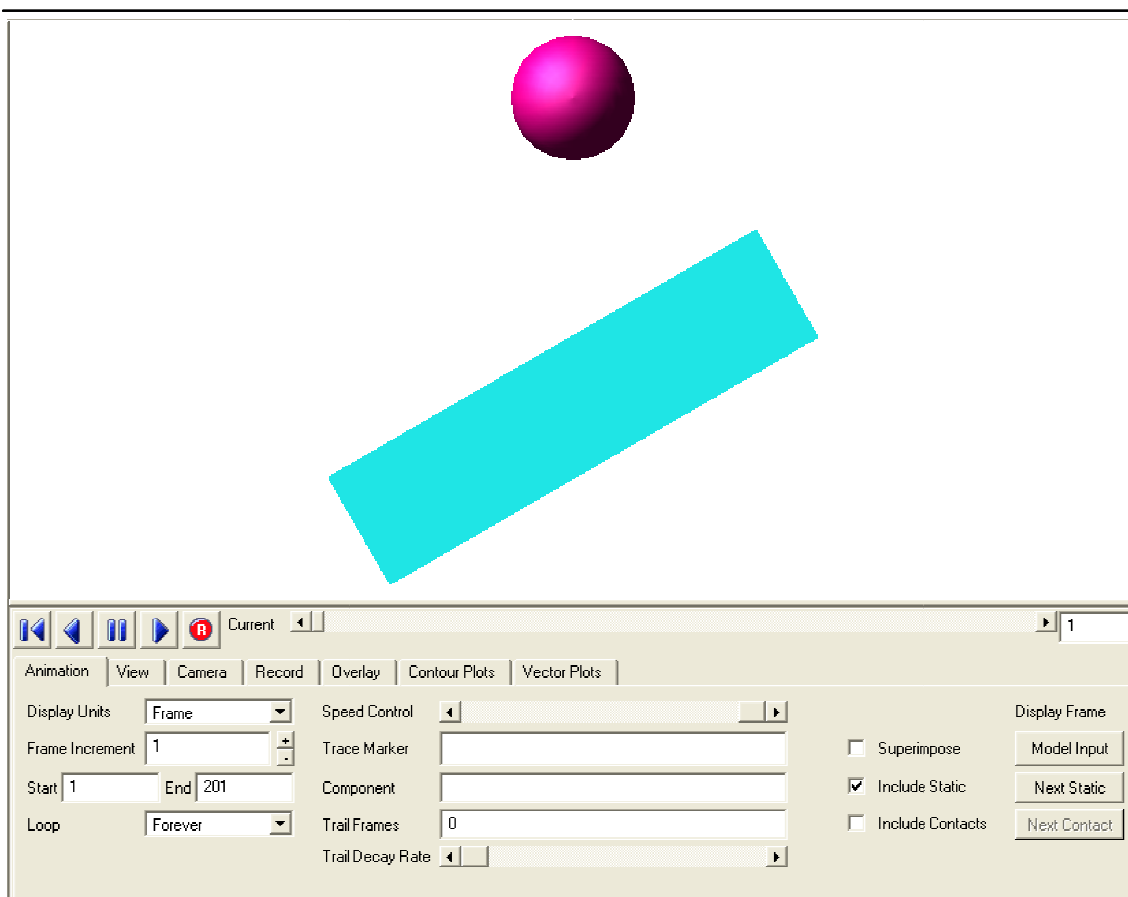


Figura 4.32: Carga y visualización de animaciones en el Postprocesador

Ahora se podrá reproducir, con el cuadro que se muestra, cambiar la cámara, la vista, la calidad y grabar vídeos para su exportación, lo que se hará de la siguiente forma:

Primero, en “File Name” se seleccionará el nombre de la animación y se definirá la calidad de la misma.

Se pulsará el icono de grabar  y posteriormente, el play .

El archivo se grabará en la carpeta seleccionada por defecto en formato AVI.

Tras realizar un manual básico para el manejo de ADAMS, a continuación se profundizará en lo que realmente ocupa el presente proyecto: la implementación de fricción en las juntas del robot y la implementación de los distintos tipos de impacto que se producen entre el robot y el suelo.

4.8 IMPLEMENTACIÓN DE FRICCIÓN EN LAS JUNTAS

Dependiendo del tipo de giro que tengan las distintas articulaciones del robot, se desplegarán una serie parámetros que se podrán ajustar de tal manera que se consiga simular el movimiento del robot en las condiciones dadas.

Las juntas que tiene el robot, se pueden dividir en juntas de revolución y juntas traslacionales.

Las juntas de revolución aparecen prácticamente en la totalidad de articulaciones del robot, mientras que las juntas traslacionales quedan reducidas únicamente al movimiento que realiza la cadera.

Para añadir las fricciones lo primero que hay que hacer es poner el puntero sobre la articulación del robot a la cual se la quiera dotar de fricción. Se aconseja darle a “Select” para que el programa marque la junta a la que se está haciendo referencia, sobre todo cuando se dispone de multitud de articulaciones estando muy próximas unas de otras.

Una vez seleccionada ya la junta, se le da de nuevo al botón derecho, se elige la junta en cuestión y se hace clic en “Modify”.

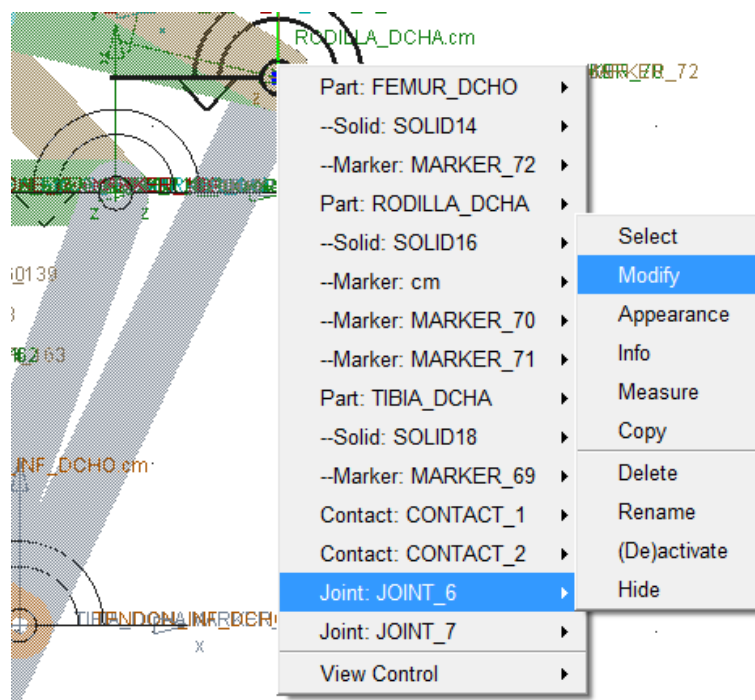


Figura 4.33: Implementación de fricción en la junta

Tras seleccionar “Modify”, aparece otra ventana en la cual tenemos que establecer que la junta o articulación va a presentar fricción. Se hace clic en “Joint friction”.

El robot presenta inicialmente la articulación como si fuese ideal, es decir, sin ningún tipo de fricción ni rozamiento que le impida el movimiento o que disminuye el movimiento de éste. A partir de aquí ya se le podrá dotar al robot de fricción.

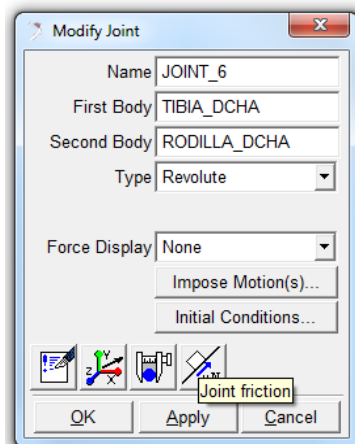


Figura 4.34: Opciones al entrar en la junta

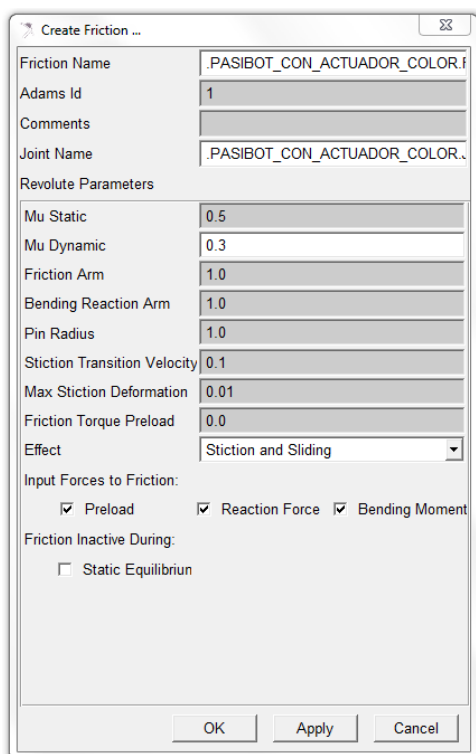
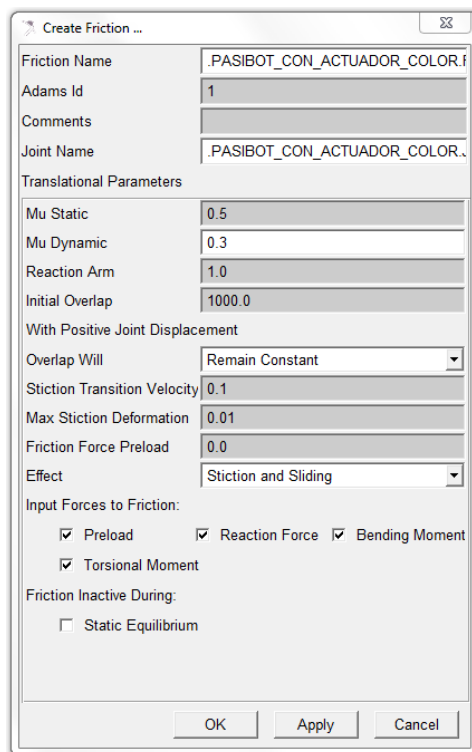


Figura 4.35: Parámetros a definir en una junta de revolución

Aparece la ventana “Create Friction...”. En ella se van a introducir los distintos parámetros para establecer la fricción. Más adelante se detallan cada uno de estos parámetros y el rango de los valores sobre los que están definidos.

Esta ventana aparecerá siempre y cuando la articulación sobre la cual se quiera establecer la fricción sea de revolución. Para una articulación del tipo traslación, el cuadro de diálogo presentará las siguientes diferencias:



Friction Name	.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.F
Adams Id	1
Comments	
Joint Name	.PASIBOT_CON_ACTUADOR_COLOR.
Translational Parameters	
Mu Static	0.5
Mu Dynamic	0.3
Reaction Arm	1.0
Initial Overlap	1000.0
With Positive Joint Displacement	
Overlap Will	Remain Constant
Stiction Transition Velocity	0.1
Max Stiction Deformation	0.01
Friction Force Preload	0.0
Effect	Stiction and Sliding
Input Forces to Friction:	
<input checked="" type="checkbox"/> Preload	<input checked="" type="checkbox"/> Reaction Force
<input checked="" type="checkbox"/> Torsional Moment	<input checked="" type="checkbox"/> Bending Moment
Friction Inactive During:	
<input type="checkbox"/> Static Equilibrium	

Figura 4.36: Parámetros a definir en una junta de traslación

4.8.1 PARÁMETROS EN JUNTAS DE REVOLUCIÓN

- ***Mu Static (Mu Estática)***

Define el coeficiente de fricción estático en la articulación. La magnitud de la fuerza de fricción es el producto de Mu Static y la magnitud de la fuerza normal de la articulación, por ejemplo:

Magnitud de la fuerza de fricción $F = \mu \cdot N$, donde μ = Mu estática y N = fuerza normal.

La fuerza de fricción estática actúa para oponerse a la fuerza neta o el par a lo largo de los grados de libertad de la articulación.

El rango es ≥ 0 .

- ***Mu Dynamic (Mu Dinámica)***

Define el coeficiente de fricción dinámica. La magnitud de la fuerza de fricción es el producto de Mu Dynamic y la magnitud de la fuerza normal de la articulación, por ejemplo:

Magnitud de la fuerza de fricción $F = \mu \cdot N$, donde μ = Mu dinámica y la fuerza N = fuerza normal.

La fuerza de fricción dinámica actúa en la dirección opuesta a la velocidad de la articulación.

El rango es >0 .

- ***Friction Arm (Fricción del brazo)***

Define el brazo de palanca efectivo utilizado para calcular la componente axial del par de fricción. El valor por defecto es de 1.0, y el rango es >0 .

- ***Bending Reaction Arm (Brazo de reacción de flexión)***

Define el momento efectivo del brazo que se usa para calcular la contribución de los momentos de flexión en el par de fricción en la articulación de giro. El valor por defecto es de 1.0, y el rango es >0 .

- ***Pin Radius (Radio del perno)***

Define el radio del perno. El valor por defecto es de 1.0, y el rango es >0 .

- ***Stiction Transition Velocity (Velocidad de transición de la fricción estática)***

Define el umbral de velocidad absoluta para la transición desde la fricción dinámica hasta la fricción estática. Si la velocidad absoluta relativa del “marker” de la articulación es inferior al valor, entonces la fricción estática actúa para hacer la articulación conjunta.

El valor por defecto es de 0,1 unidad de longitud/unidad de tiempo en la superficie de contacto en la articulación, y el rango es >0 .

- ***Max Stiction Deformation (Máxima deformación de la fricción estática)***

Define el desplazamiento máximo que se puede dar en una articulación, una vez que la fuerza de fricción en la articulación entra en régimen de fricción estática. La ligera deformación permite a ADAMS solucionar fácilmente las condiciones de Coulomb para la fricción estática, por ejemplo:

Magnitud de la fuerza de fricción $<$ estática * Fuerza normal.

Por lo tanto, incluso a velocidad 0, se puede aplicar una fuerza de fricción finita si la dinámica del sistema así lo requiere.

El valor por defecto es 0.01 unidades de longitud, y el rango es >0 .

- ***Friction Force Preload (Fricción de la fuerza de recarga)***

Define la precarga de las fuerzas de fricción en las articulaciones, las cuales son generalmente causadas por la interferencia mecánica en el montaje de la articulación.

El valor por defecto es 0,0, y el rango es 0.

- ***Effect (Efecto)***

Define los efectos de fricción en el modelo de fricción, ya sea fricción estática y de deslizamiento, fricción estática o de deslizamiento. Fricción estática es un efecto de fricción estática, mientras que el deslizamiento es un efecto de fricción dinámica. Excluyendo fricción estática en simulaciones que no lo requieran, se puede mejorar en gran medida la velocidad de simulación. El valor predeterminado es fricción estática y de deslizamiento.

- ***Input Forces to Friction (Fuerzas de entrada para la fricción)***

Define las fuerzas de entrada para el modelo de fricción. Por defecto, todas las precargas definidas por el usuario y la fuerza de reacción en la articulación y momentos están incluidas. Se puede personalizar el modelo de fricción de la fuerza mediante la limitación de las fuerzas de entrada que se especifique. Las entradas para un conjunto de traslación son:

- Precarga
- Fuerza de reacción
- Momento de flexión

- ***Friction Inactive During (Duración de la fricción inactiva)***

Se puede especificar si las fuerzas de fricción se calculan durante una simulación estática o cuasiestática.

4.8.2 PARÁMETROS EN JUNTAS DE TRASLACIÓN

- ***Mu Static (Mu Estática):***

Define el coeficiente de fricción estático en la articulación. La magnitud de la fuerza de fricción es el producto de Mu Static y la magnitud de la fuerza normal de la articulación, por ejemplo:

Magnitud de la fuerza de fricción $F = \mu \cdot N$, donde μ = Mu estática y N = fuerza normal.

La fuerza de fricción estática actúa para oponerse a la fuerza neta o el par a lo largo de los grados de libertad de la articulación.

El rango es ≥ 0 .

- ***Mu Dynamic (Mu Dinámica):***

Define el coeficiente de fricción dinámica. La magnitud de la fuerza de fricción es el producto de Mu Dynamic y la magnitud de la fuerza normal de la articulación, por ejemplo:

Magnitud de la fuerza de fricción $F = \mu \cdot N$, donde μ = Mu dinámica y la fuerza N = fuerza normal.

La fuerza de fricción dinámica actúa en la dirección opuesta a la velocidad de la articulación.

El rango es >0 .

- ***Reaction Arm (Brazo de reacción)***

Define el momento efectivo del brazo del par de reacción de la junta sobre el eje axial de la articulación de traslación (la dirección z de la junta es el marker J). Este valor se utiliza para calcular la contribución del momento de torsión para la fuerza neta de fricción.

- ***Initial Overlap (Superposición inicial)***

Define la superposición inicial de las partes deslizantes, ya sea en una junta traslacional o cilíndrica. El momento de fricción de la junta o articulación se divide por la superposición para calcular la contribución de la flexión de las fuerzas de fricción,

El valor por defecto es 1000,0 y el rango de una superposición inicial es > 0 .

- ***Overlap Will (Superposición o solapamiento)***

Para definir la fricción en una junta traslacional, ADAMS/Solver calcula la superposición de la articulación. Como las deslizaderas comunes, la coincidencia puede aumentar, disminuir o permanecer constante. Se puede establecer:

Increase (incremento): indica que la superposición se incrementa a medida que el marcador J se mueve en la dirección positiva a lo largo del marcador J, la deslizadera se mueve para estar dentro de la junta o articulación.

- *Decrease (decremento):* indica que la superposición disminuye con la traslación positiva de la junta, la deslizadera se mueve fuera de la junta.

- *Remain Constant (permanecer constante):* indique que la cantidad de superposición no cambia como en la deslizadera de las juntas; toda la superposición se mantiene dentro de la articulación.

El valor predeterminado es remain constant.

- ***Stiction Transition Velocity (Velocidad de transición de la fricción estática)***

Define el umbral de velocidad absoluta para la transición desde la fricción dinámica hasta la fricción estática. Si la velocidad absoluta relativa del “marker” de la articulación es inferior al valor, entonces la fricción estática actúa para hacer la articulación conjunta.

El valor por defecto es de 0,1 unidad de longitud/unidad de tiempo en la superficie de contacto en la articulación, y el rango es > 0 .

- ***Max Stiction Deformation (Máxima deformación de la fricción estática).***

Define el desplazamiento máximo que se puede dar en una articulación, una vez que la fuerza de fricción en la articulación entra en régimen de fricción estática. La ligera deformación permite a ADAMS solucionar fácilmente las condiciones de Coulomb para la fricción estática, por ejemplo:

Magnitud de la fuerza de fricción < estática * Fuerza normal.

Por lo tanto, incluso a velocidad 0, se puede aplicar una fuerza de fricción finita si la dinámica del sistema así lo requiere.

El valor por defecto es 0.01 unidades de longitud, y el rango es > 0.

- ***Friction Force Preload (Fricción de la fuerza de recarga)***

Define la precarga de las fuerzas de fricción en las articulaciones, las cuales son generalmente causadas por la interferencia mecánica en el montaje de la articulación.

El valor por defecto es 0,0, y el rango es 0.

- ***Effect (Efecto)***

Define los efectos de fricción en el modelo de fricción, ya sea fricción estática y de deslizamiento, fricción estática o de deslizamiento. Fricción estática es un efecto de fricción estática, mientras que el deslizamiento es un efecto de fricción dinámica. Excluyendo fricción estática en simulaciones que no lo requieran, se puede mejorar en gran medida la velocidad de simulación. El valor predeterminado es fricción estática y de deslizamiento.

- ***Input Forces to Friction (Fuerzas de entrada para la fricción)***

Define las fuerzas de entrada para el modelo de fricción. Por defecto, todas las precargas definidas por el usuario y la fuerza de reacción en la articulación y momentos están incluidas. Se puede personalizar el modelo de fricción de la fuerza mediante la limitación de las fuerzas de entrada que se especifique. Las entradas para un conjunto de traslación son:

- Precarga
- Fuerza de reacción
- Momento de flexión
- Momento de torsión

- ***Friction Inactive During (Duración de la fricción inactiva)***

Se puede especificar si las fuerzas de fricción se calculan durante una simulación estática o cuasiestática.

Todos estos parámetros son los que hay que tener en cuenta a la hora de establecer la fricción en cada una de las articulaciones.


4.9 IMPLEMENTACIÓN DE LAS FUERZAS DE CONTACTO ENTRE EL ROBOT Y EL SUELO

El contacto establecido de partida entre el suelo y el robot, obedece a la condición IMPACT.

Para poder llevar a cabo la simulación, es indispensable establecer una condición de contacto entre el robot y la superficie sobre la que éste avanza. Si no se tuviese esta condición, el robot al iniciar la simulación caería al vacío.

Se pueden elegir dos opciones a la hora de establecer el contacto entre objetos (en este caso entre el robot y el suelo), que serían los siguientes: Impact y Restitution (impacto y restitución).

A continuación se procederá a describir el proceso de creación o modificación de una fuerza de contacto:

- 1- Desde la barra de herramientas o paleta principal, se seleccionan las fuerzas, y una vez seleccionada se selecciona el icono de Contact Force .

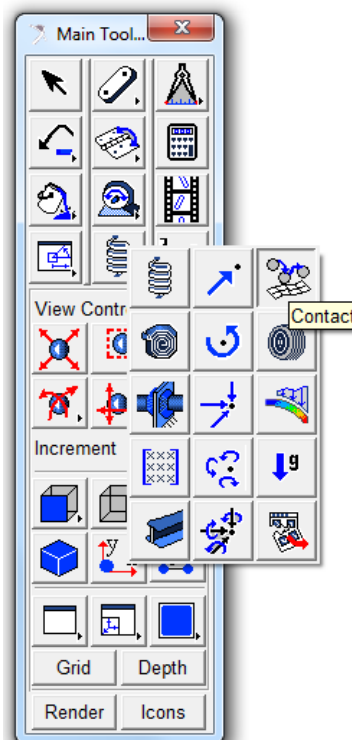


Figura 4.37: Barra de herramientas principal

2- A continuación, aparece el cuadro de diálogo de Create Contact.

3- Se introducen los valores en el cuadro de diálogo como se muestra en la Figura 4.38, y luego se selecciona Ok.

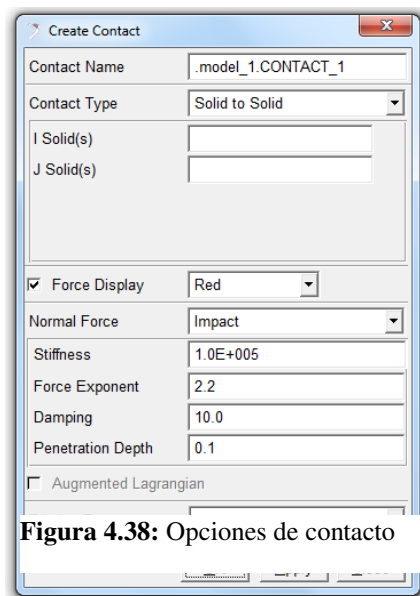



Figura 4.38: Opciones de contacto

Como curiosidad, se puede cambiar la dirección de la fuerza en los cuerpos geométricos (por ejemplo círculo, curva, plano y esfera) seleccionando el icono Change Direction .

4.9.1 DEFINIR EL TIPO Y GEOMETRÍA DEL CONTACTO

1- Se selecciona Type para el tipo de geometría con la que se va a iniciar el contacto. Las opciones que aparecen, cambian dependiendo del tipo de fuerza de contacto seleccionada.


2- En el cuadro de diálogo, se introduce el nombre de los cuerpos geométricos. Para sólidos y líneas, se pueden introducir más de una geometría, pero la geometría debe pertenecer a la misma “part”. Se pueden seleccionar los objetos desde la pantalla de Database Navigator o desde el tipo del objeto que aparece directamente en el cuadro de diálogo. Si el tipo de geometría del objeto se nombra directamente en el cuadro de diálogo, se debe seleccionar Enter para registrar el valor.

A continuación se exponen una serie de consejos para introducir los nombres de los objetos en los cuadros de texto:

- Hay que desactivar la casilla de texto y hacer doble clic para abrir el navegador de bases de datos.

- Hacer clic con el botón derecho y elegir un objeto que aparezca en la pantalla.
- Navegar por la lista de objetos disponibles y su posterior elección dentro de la misma.

Para cambiar la dirección de la fuerza, en el menú desplegable se selecciona la geometría en la que se desea cambiar la fuerza, y luego se selecciona el icono de Change

Direction .

4.9.2 PERFECCIONAR LA FUERZA NORMAL ENTRE DOS CONJUNTOS

Para perfeccionar la fuerza normal entre dos conjuntos de geometrías rígidas que están en contacto se selecciona Augmented Lagrangian.

Cuando se selecciona Augmented Lagrangian, ADAMS/View utiliza un refinamiento iterativo para asegurar que la penetración entre las geometrías es mínima. También asegura que la magnitud de la fuerza normal es relativamente insensible a la rigidez utilizada para modelar los efectos materiales locales.

Augmented Lagrangian sólo está disponible cuando se define el contacto por “restitution”. En este método, ADAMS/Solver resuelve el contacto de las fuerzas desde un parámetro denominado “penalti” (penalización) y un coeficiente de restitución. El parámetro de penalización aplica la restricción unilateral, y el coeficiente de restitución controla la disipación de la energía en el contacto.

4.9.3 PARÁMETROS A TENER EN CUENTA EN UN CONTACTO BASADO EN RESTITUCIÓN

Seleccionar Normal Force para Restitution.

- 1- Introducir el valor de penalización para definir las propiedades de rigidez local entre los materiales en contacto.
- 2- Un valor elevado de “penalty” asegura que la penetración de una geometría sobre otra será pequeña. Valores grandes, sin embargo, causan dificultades de integración numérica. Un valor de 10^6 es adecuado para los sistemas modelados en el Sistema

Internacional. Para más información sobre cómo modificar este valor, se puede consultar la definición ampliada de contacto en el ADAMS/Solver y su ayuda en línea.

- 3- Introducir el coeficiente de restitución, el cual tiene en cuenta la pérdida de energía durante el contacto.

Un valor de cero indica un contacto perfectamente plástico entre los cuerpos que chocan.

Un valor igual a la unidad, indica un contacto perfectamente elástico, no habiendo por tanto pérdida de energía.

El coeficiente de restitución es función de dos materiales que entran en contacto. Para obtener información sobre los tipos de materiales en comparación con los valores de uso del coeficiente de restitución se puede consultar la siguiente tabla que aparece en el programa:

Material 1	Material 2	Mu static	Mu dynamic	Restitution coefficient
Dry steel	Dry steel	0.70	0.57	0.80
Greasy steel	Dry steel	0.23	0.16	0.90
Greasy steel	Greasy steel	0.23	0.16	0.90
Dry aluminium	Dry steel	0.70	0.50	0.85
Dry aluminium	Greasy steel	0.23	0.16	0.85
Dry aluminium	Dry aluminium	0.70	0.50	0.85
Greasy aluminium	Dry steel	0.30	0.20	0.85
Greasy aluminium	Greasy steel	0.23	0.16	0.85
Greasy aluminium	Dry aluminium	0.30	0.20	0.85
Greasy aluminium	Greasy aluminium	0.30	0.20	0.85
Acrylic	Dry steel	0.20	0.15	0.70
Acrylic	Greasy steel	0.20	0.15	0.70
Acrylic	Dry aluminium	0.20	0.15	0.70
Acrylic	Greasy aluminium	0.20	0.15	0.70
Acrylic	Acrylic	0.20	0.15	0.70

Nylon	Dry steel	0.10	0.06	0.70
Nylon	Greasy steel	0.10	0.06	0.70
Nylon	Dry aluminium	0.10	0.06	0.70
Nylon	Greasy aluminium	0.10	0.06	0.70
Nylon	Acrylic	0.10	0.06	0.65
Nylon	Nylon	0.10	0.06	0.70
Dry rubber	Dry Steel	0.80	0.76	0.95
Dry rubber	Greasy steel	0.80	0.76	0.95
Dry rubber	Dry aluminium	0.80	0.76	0.95
Dry rubber	Greasy aluminium	0.80	0.76	0.95
Dry rubber	Acrylic	0.80	0.76	0.95
Dry rubber	Nylon	0.80	0.76	0.95
Dry rubber	Dry rubber	0.80	0.76	0.95
Greasy rubber	Dry steel	0.63	0.56	0.95
Greasy rubber	Greasy steel	0.63	0.56	0.95
Greasy rubber	Dry aluminium	0.63	0.56	0.95
Greasy rubber	Greasy aluminium	0.63	0.56	0.95
Greasy rubber	Acrylic	0.63	0.56	0.95
Greasy rubber	Nylon	0.63	0.56	0.95
Greasy rubber	Dry rubber	0.63	0.56	0.95
Greasy rubber	Greasy rubber	0.63	0.56	0.95

Tabla 4.1: Coeficientes a tener en cuenta en el contacto entre dos materiales

4.9.4 PARÁMETROS A TENER EN CUENTA EN UN CONTACTO BASADO EN IMPACTO

- 1- Se selecciona Normal Force para Impact.
- 2- Introducir los siguientes valores:

- **Stiffness (rigidez):** Especifica la rigidez del material que se va a utilizar para calcular la fuerza normal para el modelo de impacto.

En general, cuanto mayor es la rigidez, más rígidos son los cuerpos en contacto.

NOTA: Al cambiar las unidades de longitud en ADAMS/View, la rigidez de los contactos presenta una escala para ello (factor de longitud elevado al exponente de la fuerza). Cuando se cambian las unidades de la fuerza, la rigidez sólo permanece a escala para el factor de conversión de la fuerza.

- **Force Exponent (exponente de la fuerza):** ADAMS/Solver trata las fuerzas normales como un amortiguador. Si la penetración de amortiguación está por encima, da lugar a una penetración instantánea entre las geometrías de los contactos. ADAMS/Solver calcula la contribución de la rigidez del material para las fuerzas normales instantáneas como:

$$\text{RIGIDEZ} * (\text{PENALTY})^{**}\text{EXPONENT}$$

- **Damping (amortiguación):** Se introduce este valor para definir las propiedades de amortiguación del material en contacto. Una buena regla general es que el coeficiente de amortiguamiento es de aproximadamente el uno por ciento del coeficiente de rigidez.
- **Penetration Depth (profundidad de penetración):** Este valor indica el valor para el que ADAMS/Solver tome la amortiguación como completa. El programa utiliza una función de pasos cúbicos para aumentar el coeficiente de amortiguamiento de cero hasta una penetración de valor cero, llegando a la amortiguación total cuando la penetración llega a la penetración de la amortiguación.

Un valor razonable para este parámetro es de 0,01 mm.

4.9.5 MODELADO DE LOS EFECTOS DE LA FRICCIÓN EN LOS PUNTOS DE CONTACTO CON EL MÓDULO DE FRICCIÓN DE COULOMB

- 1- Seleccionar Friction Force para Coulomb.
- 2- Se ajusta la fricción de Coulomb en On, Off, o Dinámica sólo para definir si los efectos de fricción se van a incluir o no.
- 3- En el cuadro de Static Coefficient, se especifica el coeficiente de fricción en un punto de contacto cuando la velocidad de deslizamiento es menor que el valor de velocidad de transición estática. Para obtener información sobre los tipos de material en comparación con los valores de uso del coeficiente de fricción estática, se deben de consultar las propiedades de los materiales de contacto.

Valores excesivamente grandes del coeficiente estática pueden causar dificultades de integración.

Rango: Coeficiente estático ≥ 0 .

- 4- En el cuadro de diálogo de Dynamic Coefficient, se especifica el coeficiente de fricción en un punto de contacto cuando la velocidad de deslizamiento es mayor que el valor de la velocidad de transición de fricción. Para obtener información sobre los tipos de material en comparación con los valores de uso del coeficiente de fricción dinámico, se debe consultar el manual de propiedades de los materiales de contacto.

Valores excesivamente grandes del coeficiente dinámico pueden causar dificultades de integración.

Rango: $0 \leq \text{Coeficiente dinámico} \leq \text{Coeficiente estático}$.

- 5- En el cuadro de diálogo de Static Transition Velocity (velocidad de transición estática), se introduce la velocidad de transición estática.
- 6- En el cuadro de diálogo de Friction Transition Velocity (velocidad de transición de fricción), se introducen los valores de velocidad de transición de fricción.

ADAMS/Solver gradúa la transición del coeficiente de fricción desde el valor para el coeficiente estático hasta el valor del coeficiente dinámico como para la velocidad de transición de contacto en el punto en el cual se produce el incremento. Cuando la

velocidad de deslizamiento es igual al valor especificado para la velocidad de transición de fricción, el coeficiente efectivo de fricción formará parte del coeficiente dinámico.

Valores bajos de velocidad de transición de fricción causan dificultades de integración. Se debe especificar este valor como:

$$\text{Friction Transition Velocity} \geq 5 * \text{ERROR}$$

Donde el error es el error de integración utilizado para obtener la solución. Su valor por defecto es de 10^{-3} .

$$\text{Rango: Friction Transition Velocity} \geq \text{Static Transition Velocity} \geq 0.$$

4.9.6 MODELADO DE LOS EFECTOS DE LA FRICCIÓN EN LOS PUNTOS DE CONTACTO CON SU PROPIO MODELO

1. Se selecciona Friction Force para User Defined.
2. Se introducen los parámetros de una subrutina definida por el usuario, CNFSUB, y se introduce el nombre de la rutina.
3. En el cuadro de diálogo de la velocidad de transición estática se introduce la velocidad de transición estática.

ADAMS/Solver gradúa la transición desde el valor del coeficiente dinámico hasta el valor del coeficiente estático, tales como la velocidad de deslizamiento en el punto de contacto en el cual empieza a disminuir. Cuando la velocidad de deslizamiento es igual al valor que se especifica para la velocidad de transición estática, el coeficiente efectivo de fricción se establece en el valor del coeficiente estático.

Rango: $0 < \text{Velocidad de transición estática} \leq \text{Velocidad de transición de fricción}$.

Nota: Un valor pequeño de velocidad de transición estática causa dificultades numéricas en la integración. Una regla general para la especificación de este valor es:

$$\text{Velocidad de transición estática} \geq \text{ERROR}$$

Donde ERROR es la precisión solicitada para la integración. Su valor por defecto es de 10^{-3} .

Capítulo 5:

Modelo teórico y estudio de fricción en MSC Adams

5.1. MODELO TEORICO

El estudio de la fuerzas generadas por la fricción debida a los contactos originados en las juntas traslacionales y los rodamientos, así como el contacto de los pies con el suelo, no puede ser entendido sin hacer un estudio previo del modelo a estudio para ello el modelo elegido es el desarrollado por José Manuel Jiménez Crespo en su Proyecto: Análisis y Simulación del Robot Bípedo Pasibot.

El diseño original del *PASIBOT* fue desarrollado por el grupo *MAQLAB* del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid, en el año 2007. Se trata de un diseño sencillo y optimizado de un robot bípedo, debido a que solo cuenta con un grado de libertad.

El material empleado en la fabricación de los eslabones que forman parte del robot original es *Aluminio 2024-T351*, cuyas propiedades son las siguientes:

<i>Propiedades</i>	
Densidad	2.700 Kg/m ³
Módulo de elasticidad	73,5 Gpa
Coefficiente de Poisson	0,33
Tensión admisible	425 MPa

Tabla 5.1: Propiedades del *Al 2024-T351*

Se eligió esta aleación por tratarse de un material extremadamente fuerte, con buena maquinabilidad para uso mecánico y que, además, ha sido empleado en otros estudios universitarios como el elaborado por la Universidad Politécnica de Madrid: “*Generación de un campo de tensiones residuales de compresión en Aluminio 2024-T351 mediante tratamiento por onda de choque generada por láser*”.

El diseño está basado en dos mecanismos: el *Chebyshev* y el *Pantógrafo* mencionados con anterioridad, la complejidad del Pasibot y su movimiento ha sido estudiado con anterioridad, con objeto de realizar un análisis coherente a las fuerzas

generadas debidas a la fricción y dentro del entorno computacional de MSC Adams. Se procede a realizar un estudio detallado de: Evolución del modelo del Pasibot, el modelo simplificado del Pasibot que se ve sometido al estudio de fricciones, el Pasibot como robot y todos sus componentes, y el caminar como función biológica en los animales bípedos con énfasis a su simulación sobre el caminar del ser humano.

5.2. EVOLUCION DE DISEÑO Y ESTRUCTURA DEL PASIBOT

5.2.1 DISEÑO INICIAL MODELO ANALITICO Y BASE

El diseño de la pierna ha seguido la línea de emulación del movimiento mediante la disposición de mecanismos clásicos para intentar reducir al máximo los grados de libertad y con ellos la necesidad de actuadores, cumpliendo con las siguientes especificaciones:

- El robot bípedo debe ser capaz de realizar la dinámica andante.
- El coste debe de ser bajo.
- El robot debe tener menos actuadores que juntas.
- El robot debe utilizar actuadores rotativos.
- Para el diseño de la pierna del bípedo, en el plano sagital se deben utilizar mecanismos de barras articuladas.

Además de las premisas anteriores, debe cumplir que con un solo grado de libertad, un movimiento rotatorio, sea capaz de generar todo un ciclo completo de movimiento de la pierna, con un periodo de apoyo y otro de vuelo. Además, el movimiento de la pierna debe cumplir con dos requisitos fundamentales: que el tiempo de de vuelo de la pierna debe ser inferior al tiempo de apoyo, aunque el recorrido de la pierna en vuelo es mayor al de apoyo, y que el recorrido de la pierna en el periodo de apoyo sea lo más lineal posible y con velocidad constante.

5.2.2 DISEÑO MODIFICADO

El diseño de la pierna propuesto a estudio parte del diseño anterior. La principal diferencia radica en la inversión de la posición del pantógrafo según la línea trazada por los puntos BMA. La posición final se muestra a continuación en la figura 2.1.2. Además, el pantógrafo es mayor proporcionalmente al modelo inicial para dar mayor esbeltez a la pierna. La notación es la misma, con el consiguiente cambio de posición de los puntos. Esta notación será seguida en el resto del proyecto:

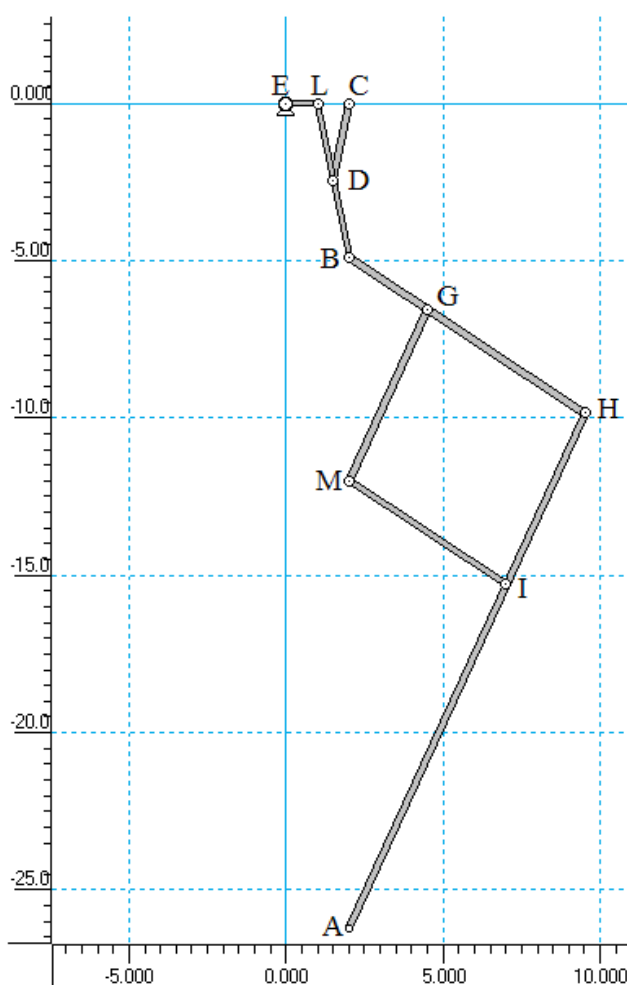


Figura 5.1: Diseño Básico Final.

Las dimensiones de este diseño son enormes, teniendo en cuenta las unidades están en metros. Los diseños posteriores verán reducidas las dimensiones hasta unas proporciones lógicas.

5.2.3. DESCRIPCIÓN DEL MECANISMO DE LA PIERNA

La pierna está compuesta por la combinación de dos mecanismos, un Chebyshev y un Pantógrafo. Su funcionamiento se muestra a continuación.

5.2.3.1. MECANISMO DE LINEA RECTA DE CHEBYSHEV

El Mecanismo de Línea Recta de Chebyshev, o de Hoekens, es una manivela balancín de Grashof, cuya virtud principal es la de describir una línea prácticamente recta en una parte de su trayectoria. Se caracteriza además por poseer una velocidad casi constante en toda la parte central de su movimiento de línea recta.

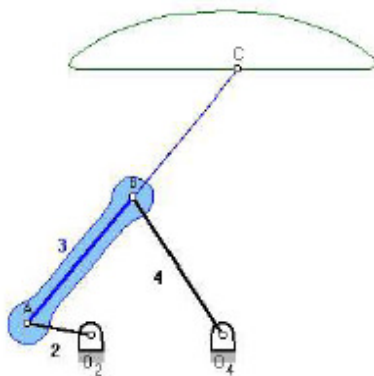
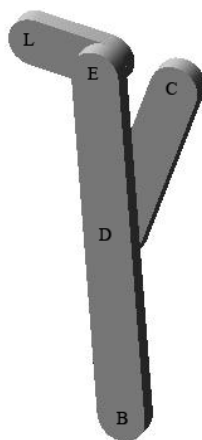


Figura 5.2: Mecanismo Chebyshev.

Las proporciones de la manivela-balancín, o mecanismo de Chebyshev son:

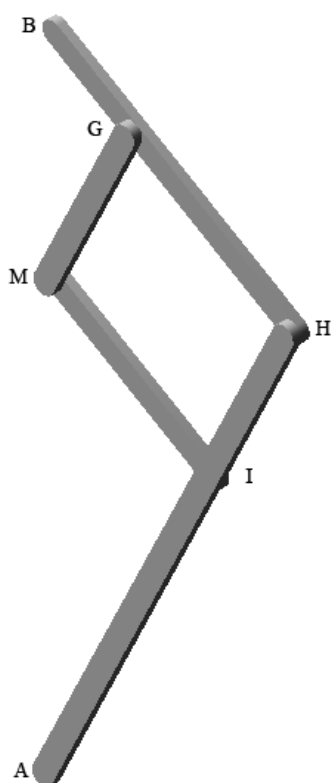


$$\begin{aligned}\overline{LC} &= 2 \cdot \overline{LE} \\ \overline{CD} &= 2 \cdot \overline{LE} \\ \overline{EB} &= 5 \cdot \overline{LE}\end{aligned}$$

Figura 5.3: Notación del Chebyshev

5.2.3.2. PANTOGRAFO:

El pantógrafo es un cuadrilátero articulado que sirve para dibujar una figura homotética a una dada.



Las características más importantes son que los puntos A, M y B siempre están lineados y el mecanismo puede ser amplificador o reductor, además de inversor, en función del punto que se fije (A, M y B).

Si se fija el punto A y se mueve M se producirá una ampliación directa del movimiento reflejada en el punto B, y por el contrario, si se mueve el punto B se producirá una reducción directa del movimiento en el punto M.

Figura 5.4: Notación del Pantógrafo.

Si lo que se quiere es invertir el movimiento, se fijará el punto M. Si se da movimiento en el punto B se producirá una reducción inversa del movimiento en A, y si por el contrario se da el movimiento en A, en el punto B se verá reproducido amplificado e invertido. Éste último caso es el aplicado en el mecanismo.

Las características del pantógrafo vienen establecidas por las siguientes proporciones:

$$\frac{\overline{BG}}{\overline{BM}} = \frac{\overline{BH}}{\overline{HA}} \Rightarrow \frac{90mm}{180mm} = \frac{270mm}{540mm} = \frac{1}{2}$$

Como se puede apreciar, los triángulos \overline{BGM} y \overline{BHA} son semejantes, por lo que se cumple que los puntos B, M y A están alineados siempre.

La razón de homotecia del pantógrafo, es decir, su relación de amplificación-inversión es la siguiente:

$$\frac{\overline{BH}}{\overline{BG}} = \frac{270mm}{90mm} = 3$$

La razón de proporción del pantógrafo es 3:1.

5.2.3.3 ACCIÓN CONJUNTA DE AMBOS MECANISMOS.

El mecanismo en conjunto queda de la siguiente manera:

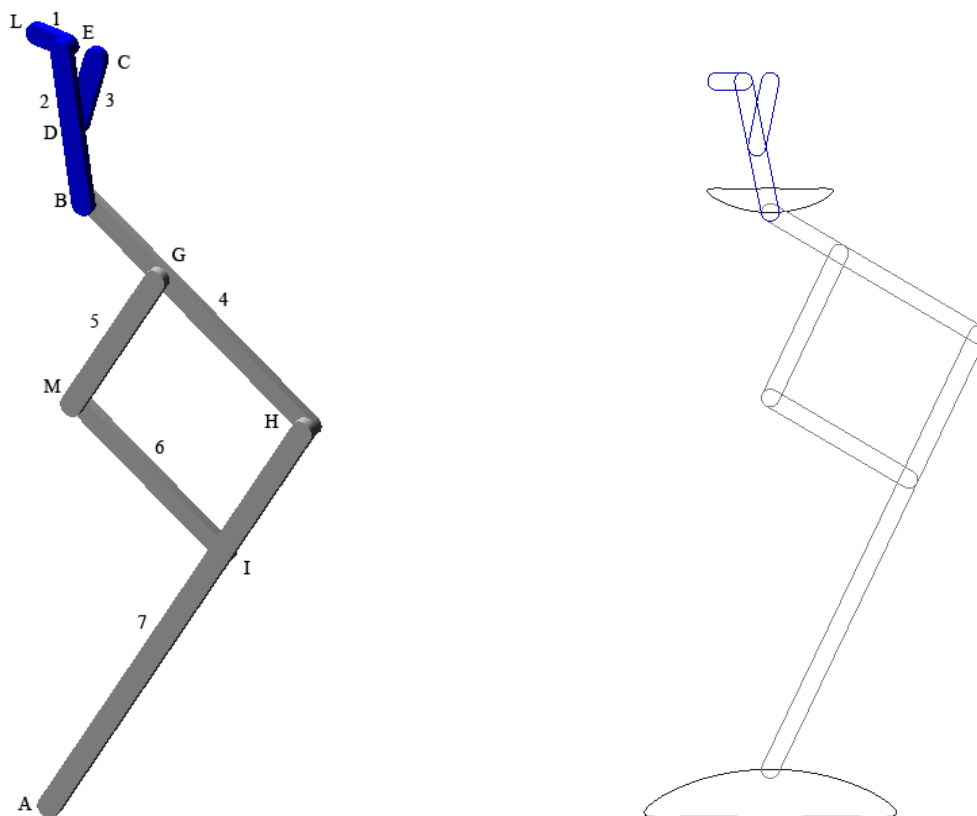


Figura 5.5: Notación utilizada y trayectorias.

En el mecanismo de la pierna aparece representado en azul el mecanismo de Chebyshev y en gris plata el Pantógrafo. El Chebyshev genera la trayectoria en el punto B a partir del movimiento rotatorio de la manivela 1 en el punto L, y el pantógrafo la reproduce ampliada e invertida en el punto A. La numeración de los eslabones de la figura 2.3.3.1 va a ser la que se tenga en cuenta a partir de ahora. En ella se puede apreciar la trayectoria del Chebyshev y la trayectoria ampliada e invertida del pantógrafo.

5.3. IMPLEMENTACION DEL DISEÑO MODIFICADO EN MSC. ADAMS.

5.3.1 MODELO FIBRILAR.

A partir del diseño realizado del modelo de pierna implementado en el programa de diseño en 2-D Working Models, se procedió a su reproducción en el programa de simulación MSC.ADAMS 2005, utilizando la aplicación View, indicada para el diseño y simulación de movimientos de mecanismos.

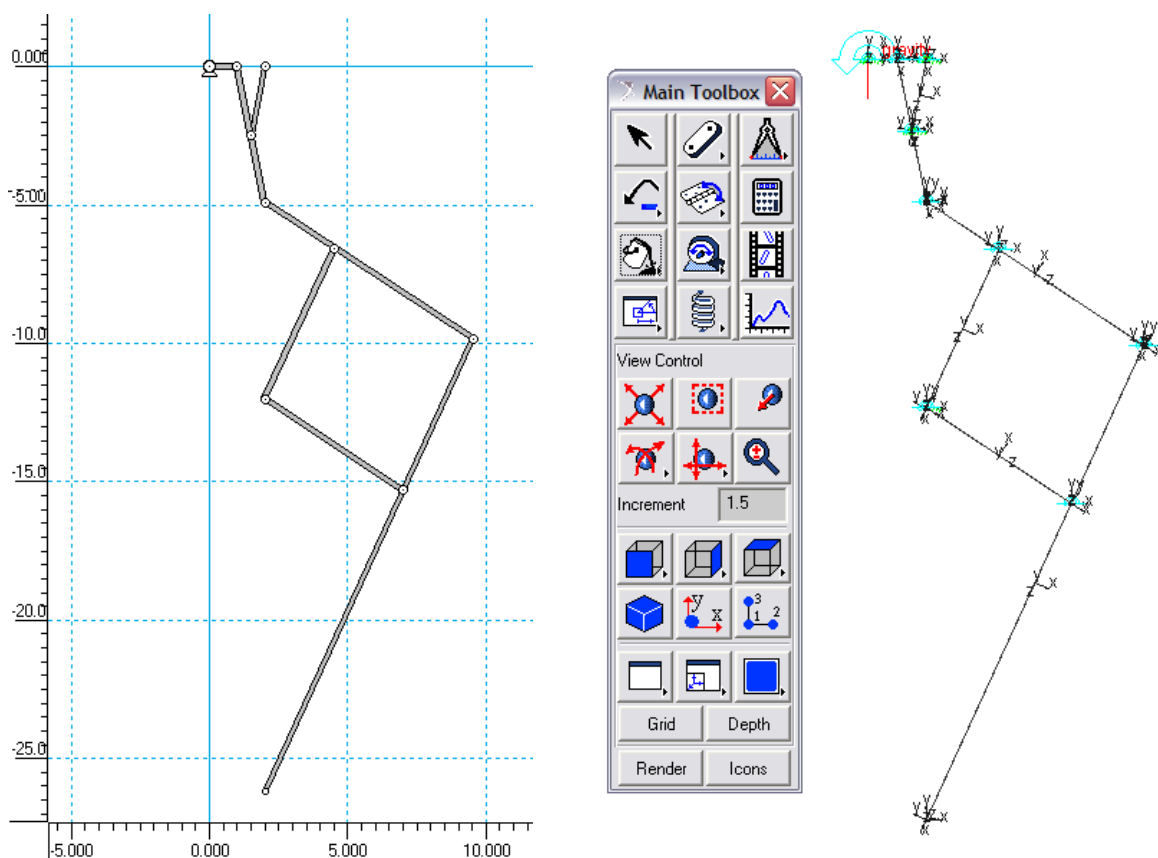


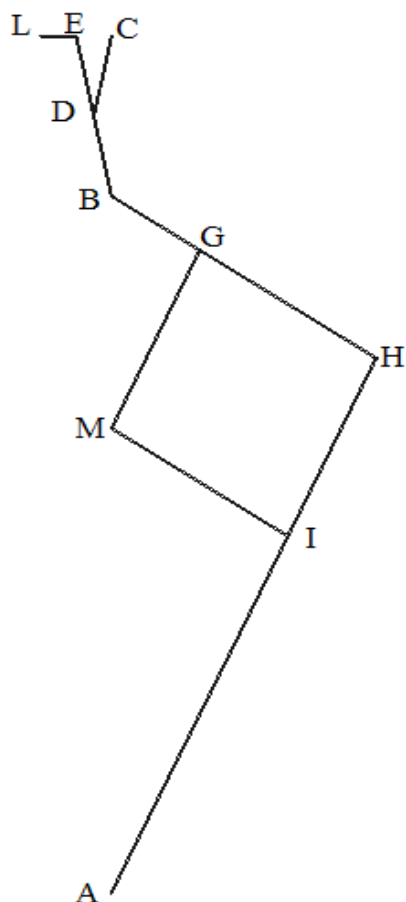
Figura 5.6: Modelo FIBRILAR implementado en Working Models y en MSC.ADAMS.

Para ello primero se realizó la toma de medidas de los eslabones que comprenden el mecanismo así como de la situación en coordenadas cartesianas de la situación de todos los elementos. Debido al enorme tamaño de los elementos en Working Models se decidió utilizar una escala inicial de 1:10, ya que este primer modelo sólo sería utilizado para comprobar la cinemática del mecanismo en MSC.ADAMS. A continuación, para la recreación del modelo en ADAMS se generó una serie de puntos en coordenadas cartesianas, y a partir de los mismos se crearon los eslabones pertenecientes al mecanismo.

Para el diseño de los mismos en un primer lugar sólo se les asignó espesor y anchura, la longitud quedaba establecida al crear los eslabones a partir de los puntos iniciales. Los eslabones fueron unidos con pares cinemáticos de rotación y los eslabones 1, 3, 5 y 6 se unieron con juntas de rotación al suelo (“Ground”) para fijar su posición. Por último se dio movimiento rotatorio de velocidad angular constante de $30^\circ/\text{s}$ a la manivela de entrada 1 para simular la actuación de un motor rotativo.

En la figura 5.1.4.1.2 se puede ver el diseño inicial en Working Models y su reproducción en MSC.ADAMS. Este diseño fue el utilizado para las primeras simulaciones de movimiento en MSC.ADAMS, y debido al escaso espesor de los eslabones se lo denominó DISEÑO FIBRILAR.

Las características dimensionales aparecen a continuación:



Eslabón 1: Manivela:

$$\overline{LE} = 100 \text{ mm}$$

Eslabón 2: Biela:

$$\overline{EB} = 500 \text{ mm} \quad \overline{ED} = 250 \text{ mm}$$

Eslabón 3: Balancín:

$$\overline{CD} = 250 \text{ mm}$$

Eslabón 4: Fémur:

$$\overline{BH} = 900 \text{ mm} \quad \overline{BG} = 300 \text{ mm} \quad \overline{GH} = 600 \text{ mm}$$

Eslabón 5: Tendón Superior:

$$\overline{GM} = 600 \text{ mm}$$

Eslabón 6: Tendón Inferior:

$$\overline{MI} = 600 \text{ mm}$$

Eslabón 7: Tibia:

$$\overline{HA} = 1800 \text{ mm} \quad \overline{HI} = 600 \text{ mm} \quad \overline{IA} = 1200 \text{ mm}$$

Figura 5.7: Modelo FIBRILAR.

El espesor de todos los eslabones es de 50mm y su profundidad de 50mm.

Los puntos L, C y M están fijos al suelo (“ground” en el programa) con pares cinemáticos de rotación.

El material utilizado para las simulaciones es acero; el material utilizado será sustituido posteriormente por razones de peso y precio; de las siguientes características:

ACERO	
DENSIDAD	$7.801 \cdot 10^{-6} \text{ Kg/mm}^3$
MODULO DE YOUNG	$2.07 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$
COEFICIENTE DE POISSON	0.29

Tabla 5.2: Propiedades del acero

El modelo FIBRIAR 1 simuló de forma satisfactoria el movimiento de la pierna, correspondiendo éste al movimiento ya obtenido anteriormente en el programa Working Models, y permitió además comprobar las posibilidades del programa MSC.ADAMS en cuanto simulación de movimientos y en la toma de medidas (posición, velocidades, aceleraciones, pares de rotación, etc) pero presentaba algunos problemas, como la ligera variación de la longitud de algunos eslabones durante el movimiento, debido posiblemente a que la longitud no fue establecida inicialmente o la situación incorrecta, aunque por un margen mínimo, a la junta G de los eslabones 4 y 5.

En siguiente modelo, FIBRILAR 2, fue construido de forma similar al anterior, pero en este caso se estableció la longitud de los eslabones antes de posicionarlos y se corrigió el error de posición de la junta G. La velocidad fue modificada a 20°/s. En este modelo se corrieron los problemas anteriores de variación de longitudes de los eslabones durante las simulaciones.

El modelo FIBRILAR 2 fue el utilizado los primeros diseños de los actuadores y sus simulaciones para estudiar el comportamiento de la pierna.

5.3.2 MODELO GAMBA.

El siguiente modelo que se implementó partió del modelo PASIBOT, propuesta de diseño del grupo de investigación MAQLAB, de la Universidad Carlos III de Madrid, y especialmente del profesor Don Jesús Meneses. Este modelo, parte del modelo inicial, añade un duplicado de los eslabones fémur y tibia, pudiéndose de este modo colocarle un

pie y se utiliza un dispositivo en la cadera para que el pie entre recto durante el contacto con el suelo. Será explicado detenidamente en el CAPITULO V.

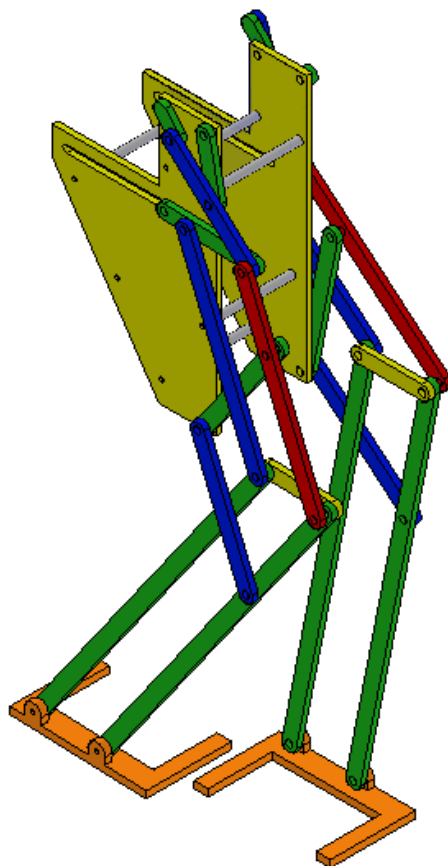


Figura 5.8: Modelo de PASIBOT en SolidWorks.

A este diseño se le eliminó ese duplicado, así como todos los componentes innecesarios (Cadera, rodilla, estabilizador y pie) para llegar al diseño elemental. Este diseño elemental será el llamado GAMBIA (pierna en italiano), y con él se llevará a cabo la mayor parte del estudio de los actuadores.

Del modelo PASIBOT implementado en SolidWorks se tomó las medidas de los eslabones y la posición, a partir de la pieza de la cadera, de los puntos fijos L, C y M. El modelo se implementó en Working Models para la toma de coordenadas de los todos los puntos, y con ellos se implementó el modelo GAMBIA en MSC.ADAMS

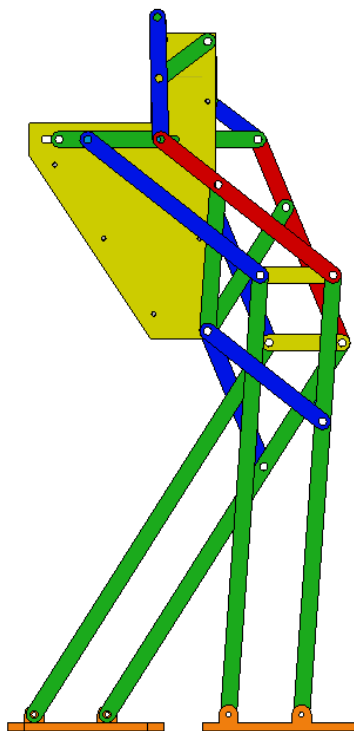


Figura 5.9: Modelo de PASIBOT. Vista lateral.

La implementación en Working Models, así como las características del modelo se exponen a continuación. Véase la reducción de medidas con respecto al modelo FIBRILAR. Las unidades de la Figura 5.10 están en mm.

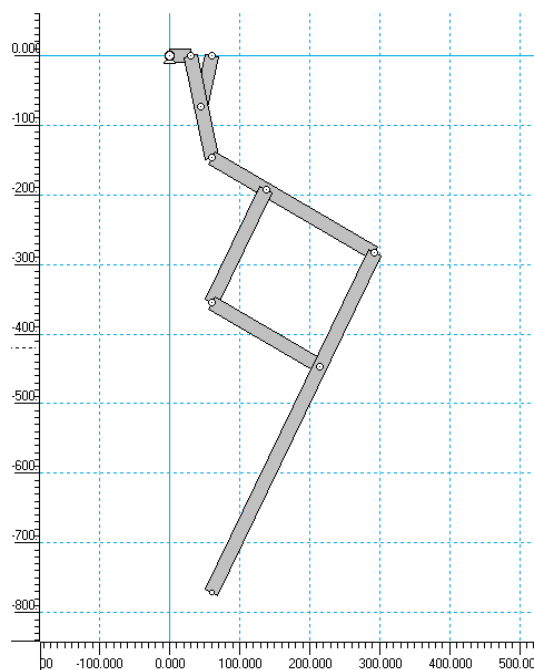


Figura 5.10: Modelo GAMBA en Working Models.

Las características del mecanismo GAMBA, se resumen en medias y propiedades estructurales. Las medidas de los eslabones que forman el mecanismo son las siguientes:

MECANISMO DE CHEBYSHEV:

- Eslabón 1: Manivela: $\overline{LE} = 30\text{ mm}$
- Eslabón 2: Biela: $\overline{EB} = 150\text{ mm}$ $\overline{ED} = 75\text{ mm}$
- Eslabón 3: Balancín: $\overline{CD} = 75\text{ mm}$

PANTÓGRAFO:

- Eslabón 4: Fémur: $\overline{BH} = 270\text{ mm}$ $\overline{BG} = 90\text{ mm}$ $\overline{GH} = 180\text{ mm}$
- Eslabón 5: Tendón sup: $\overline{GM} = 180\text{ mm}$
- Eslabón 6: Tendón inf: $\overline{MI} = 180\text{ mm}$
- Eslabón 7: Tibia: $\overline{HA} = 540\text{ mm}$ $\overline{HI} = 180\text{ mm}$ $\overline{IA} = 360\text{ mm}$

Todos los eslabones tienen 20mm de ancho y 8mm de profundidad.

El material utilizado para las simulaciones es acero, cuyas propiedades fueron mencionadas con anterioridad (Tabla 5.2).

Los puntos L, C, y M están unidos con pares cinemáticos de rodadura a un soporte fijo (“Ground”), y los puntos E, D, B, G, M, H, I son pares cinemáticos de rodadura utilizados para unir los eslabones.

La velocidad angular de la manivela 1 aplicada en el punto A es de 2π rad/s (360°/s).

Una vez implementado en MSC.ADAMS queda de la siguiente forma:

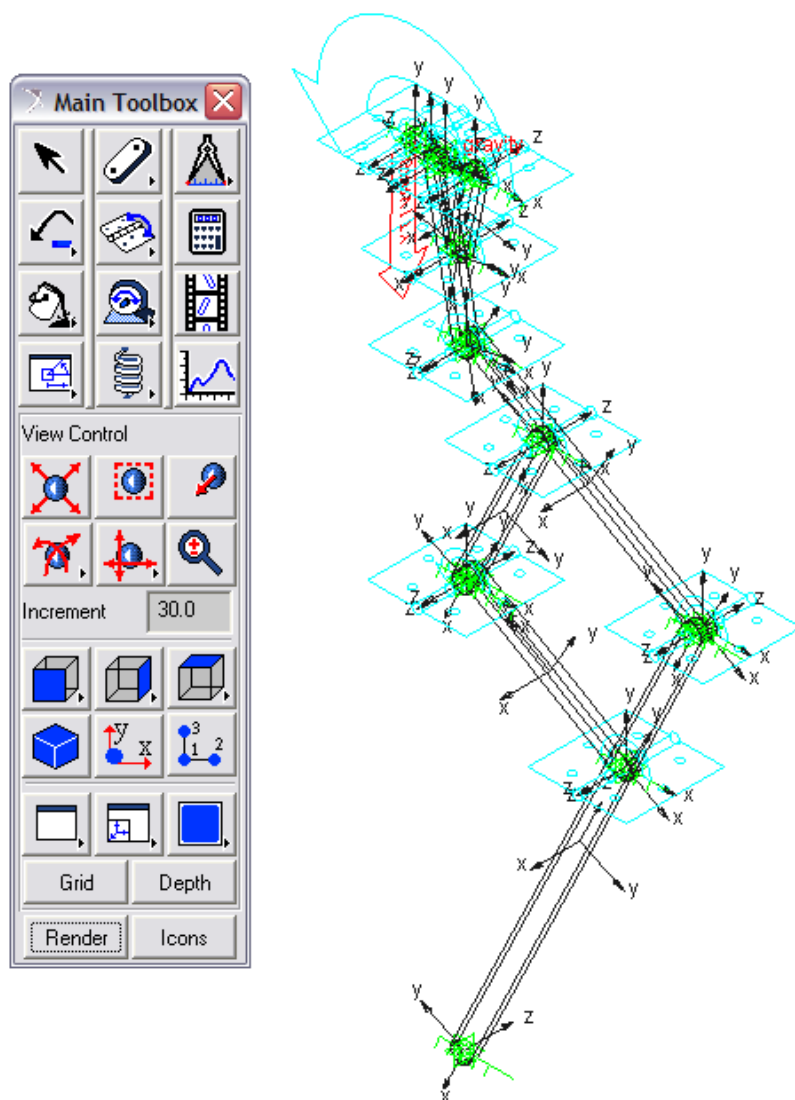


Figura 5.11: Modelo GAMBA implementado en MSC.ADAMS.

El modelo GAMBA será el utilizado para la toma de medidas de los ángulos γ_1 y γ_2 , y la posición, velocidad y aceleración del punto A en un ciclo completo de movimiento de la pierna.

5.3.3 MODELO PASIBOT

El modelo de Pasibot es un robot bípedo y como tal, está compuesto por una serie de piezas que conforman tres partes indivisibles como son: la cadera sobre la cual se monta el motor y el sistema de transmisión, la pierna izquierda y la pierna derecha que aparte de ser el soporte de la cadera con el suelo, son las partes indispensables en donde a través de los mecanismos anteriormente mencionados, se traslada el movimiento giratorio del motor a un movimiento rectilíneo acompasado de ambas piernas para mantener la estabilidad. Este conjunto tiene en su haber, una serie de piezas que se agrupan, en tres grandes grupos:

- Elementos comunes
- Elementos de unión y sujeción
- Elementos motrices y sistema de transmisión

A continuación se explican las características y los distintos componentes que integran cada uno de los grupos anteriormente mencionados.

5.3.3.1 ELEMENTOS COMUNES

Los elementos comunes son todos aquellos que forman parte del diseño original del Pasibot, y que son necesarios para describir el movimiento de paso que se pretende conseguir. Se trata por lo tanto de todas las piezas que integran los mecanismos del robot: Chebyshev, Pantógrafo y Estabilizador. De todos los eslabones que se muestran a continuación hay dos de ellos en cada pierna para reforzar la estabilidad y resistencia del robot.

- A) Caderas: Sirven de soporte físico para el mecanismo de Chebyshev y el sistema de transmisión. A través de ellas se trasmite el movimiento desde el motor a la

manivela motriz que acciona el mecanismo. El diseño original estaba formado por una sola pieza. La mejora del diseño incluye dos elementos que forman la cadera, la cadera exterior y la cadera interior. Estas dos piezas están presentes en ambas piernas.

- La cadera exterior es la que comunica el eje primario (motriz) con la manivela del Chebyshev, (agujero superior izquierdo). Sirve de soporte físico también para el balancín del Chebyshev, (agujero superior derecho) y para el punto fijo (pivote) del Pantógrafo, (agujero inferior derecho). Además lleva alojado el raíl en el que se aloja la corredera, sobre la cual desliza la deslizadera para mantener la trayectoria del pie paralela al suelo. El resto de los taladros sirven de topes de separación entre caderas.
 - La cadera interior sirve de soporte físico para el motor y el engranaje primario. Se comunica con la cadera exterior a través del agujero del eje primario.
- B) Manivela: Es el eslabón motriz del conjunto. En su punto de unión a la cadera tiene un movimiento circular proveniente del motor. En su otro extremo se une a la biela para realizar el movimiento de Chebyshev y transmite a través de ella el movimiento a todo el resto del mecanismo.
- C) Biela: Engancha en su punto superior con la manivela transmitiendo el movimiento al resto del mecanismo. En su punto medio engancha con el balancín y en el último con el estabilizador y el punto de referencia del Pantógrafo. Por lo tanto transmite el movimiento al balancín, (realizando el movimiento del Chebyshev) y también transmite el movimiento al Pantógrafo.
- D) Balancín: Engancha con el punto medio de la biela y en su otro extremo con la cadera formando un punto fijo pivotante. Se trata de una pieza fundamental para realizar el movimiento de tramo recto y elíptico propio del Chebyshev.
- E) Estabilizador: Es el eslabón encargado de realizar la trayectoria paralela al suelo de los pies para mantener el equilibrio del robot. En sus dos orificios más pequeños engancha con el fémur (correspondiente al Pantógrafo) y el contrafémur

(correspondiente al mecanismo Estabilizador). En el agujero más grande engancha con la deslizadera que se desliza sobre la corredera que mantiene la trayectoria de los mecanismos siempre recta.

- F) Deslizadera: Sirve de guía para realizar la trayectoria del estabilizador sobre la corredera. Esta trayectoria es siempre recta debido a la forma de la corredera.
- G) Corredera: Está alojada en el raíl que forma parte de la cadera exterior. Es el soporte físico por el que desliza la deslizadera del estabilizador realizando el movimiento rectilíneo de su forma.
- H) Fémur: Está conectado en su parte superior con el estabilizador y la biela, en su parte central con el tendón superior y en su parte inferior con la tibia y la rodilla. Es uno de los elementos que hace posible el correcto funcionamiento del mecanismo de Pantógrafo.
- I) Contrafémur: Realiza la misma función que el fémur pero para el mecanismo de estabilización. En su parte superior conecta con el estabilizador y en su parte inferior conecta con la rodilla y el peroné.
- J) Tendón superior: Conecta en su parte superior con el punto medio del fémur y en su parte inferior con la cadera y el tendón inferior. Este último punto es el punto de fijo de pivotaje del mecanismo de Pantógrafo, fundamental para realizar la labor de inversión y aumentación de movimiento realizado por el Chebyshev.
- K) Tendón inferior: Conecta en su parte superior con el tendón superior y la cadera (punto de pivotaje), y en su parte inferior con el punto medio de la tibia.
- L) Rodilla: Es el nexo de unión entre el fémur y la tibia, y el contrafémur y el peroné. Sirve de soporte físico para la unión del mecanismo de Pantógrafo y el de Estabilizador. Realiza el mismo movimiento que el estabilizador debido a su ubicación dentro del mecanismo.
- M) Tibia: Está conectada en su parte superior con la rodilla y el fémur, en su parte central con el tendón inferior y en su parte inferior con el pie (punto de copiado del

Pantógrafo). Es el último eslabón del mecanismo de Pantógrafo que realiza la trayectoria aumentada e invertida del Chebyshev.

- N) Peroné: Realiza la misma función que la tibia pero en el mecanismo de estabilización. En su parte superior conecta con el contrafémur y la rodilla, y en su parte inferior conecta con el pie.
- O) Pie: Es el último elemento de toda la cadena cinemática. Es el responsable del contacto del bípedo con el suelo y por lo tanto de su estabilidad y equilibrio. En el pie terminan tanto el mecanismo de Pantógrafo como el de estabilización. Está unido en sus dos orificios con la tibia y el peroné y describe el movimiento de la rodilla, que a su vez describe el movimiento del estabilizador.

En relación a los pies, se decidió cambiar el diseño de los mismos ya que las holguras existentes entre los pies originales no eran suficientes, y por lo tanto estos acababan chocando entre sí en un instante del ciclo.

5.3.3.2 ELEMENTOS DE UNIÓN Y SUJECCIÓN

Los elementos de unión son todas aquellas piezas necesarias para la fijación de los distintos componentes entre sí.

A continuación se exponen los distintos tipos de elementos de unión utilizados:

- A) Arandelas: Se sitúan entre eslabones para mejorar las fijaciones en las articulaciones asegurando una adecuada rigidez entre las mismas.
- B) Rodamientos: Se sitúan en las articulaciones de los eslabones para disminuir la fricción entre ellos.

- C) Separadores: Se colocan junto con los eslabones en sus puntos de articulación para evitar la interferencia entre los elementos que están a distintas distancias de la cadera y permitir que realicen de forma correcta su movimiento.
- D) Ejes roscados: Se emplean como soporte físico del motor y del engranaje primario. Están apoyados por ambos lados en las caderas interiores derecha e izquierda. También se emplean para unir, distanciar y mantener siempre paralelas ambas caderas. Además dotan al conjunto de una mayor rigidez a torsión.
- E) Ejes de Cadera: Se emplean para unir, distanciar y mantener siempre paralelas ambas caderas. Dotan al conjunto de una elevada rigidez a torsión.
- F) Eje principal: Sirve de soporte físico al engranaje principal, que es el encargado de transmitir el movimiento de rotación a la manivela de mecanismo de Chebyshev. Además también sirve para fijar las dos caderas entre sí de forma segura, ya que se trata de un eje con refuerzos atornillados a ambos lados de las caderas.
- G) Tornillos: Se emplean para fijar los eslabones entre sí en sus articulaciones. Los distintos tipos de tornillos utilizados son de métrica 5 y de diferentes longitudes:
- H) Tuercas: Se utilizan para fijar el motor a los ejes roscados para aumentar su sujeción y disminuir así sus vibraciones que pueden resultar perjudiciales para el funcionamiento del conjunto. Las tuercas utilizadas son de métrica 5.

5.3.3.3 ELEMENTOS MOTRICES Y SISTEMA DE TRANSMISIÓN

Los elementos motrices son todos aquellos componentes que hacen posible el movimiento del robot, desde el motor con su movimiento giratorio hasta la transmisión del mismo a través de las ruedas dentadas y correas hasta la manivela.

- A) Motor: Transforma la energía eléctrica que se le suministra en energía mecánica de movimiento de rotación en su eje de salida.

- B) Enganche motor - Eje primario: Este enganche sirve para realizar una buena fijación entre el motor y el eje primario sobre el cual se aloja la rueda dentada primaria que recibe el movimiento directo del motor y lo distribuye hacia la manivela.
- C) Rueda dentada primaria (piñón): Recibe el movimiento de rotación directamente del motor. A través de ella se empieza la distribución del mismo para llevarlo hacia arriba hasta el lugar en donde está alojada la manivela.
- D) Conjunto secundario: Recibe el movimiento del piñón primario a través de la correa en la rueda dentada. Es el escalón intermedio entre el motor y el eje final en el cual se encuentra la manivela. A través de su piñón engancha con la rueda dentada principal.
- E) Rueda dentada principal: Es final de la cadena cinemática. Recibe el movimiento del piñón secundario a través de la correa y lo transmite a través del eje principal finalmente a la manivela.
- F) Correas: Son las encargadas de transmitir el movimiento entre las ruedas dentadas. Además son las responsables de que se pueda ir subiendo de una manera rápida la transmisión hasta la ubicación de la manivela.

5.3.3.4 MODELO SIMPLIFICADO PARA MSC ADAMS

Para el estudio del movimiento del Pasibot en el software computacional MSC Adams, se utiliza un modelo simplificado en el cual los elementos implementados son los pertenecientes al grupo de Elementos comunes.

Los elementos de unión y sujeción son integrados dentro de la simulación computacional por juntas, que generan acciones debido a las fuerzas de fricción entre los distintos eslabones. Los elementos motrices y el sistema de transmisión se virtualiza directamente sobre la manivela y se impone una carga correspondiente al peso de este sistema en su CDG.

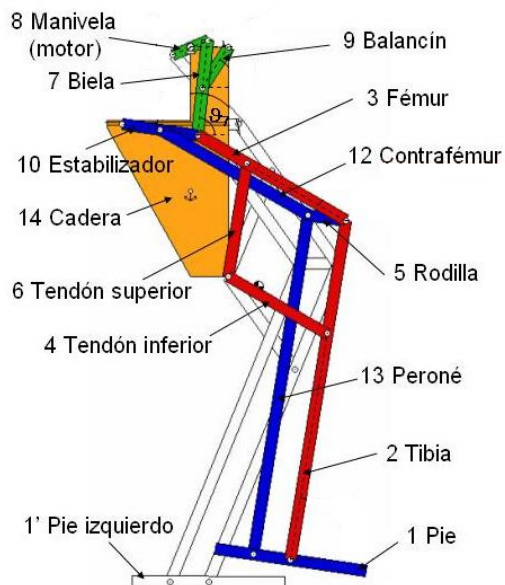


Figura 5.12: Modelo simplificado para Adams

A continuación se van a numerar cada uno de los distintos elementos comunes, siendo estos como ya se mencionó con anterioridad, los utilizados para llevar a cabo la simulación con el programa MSC Adams:

Cadera:

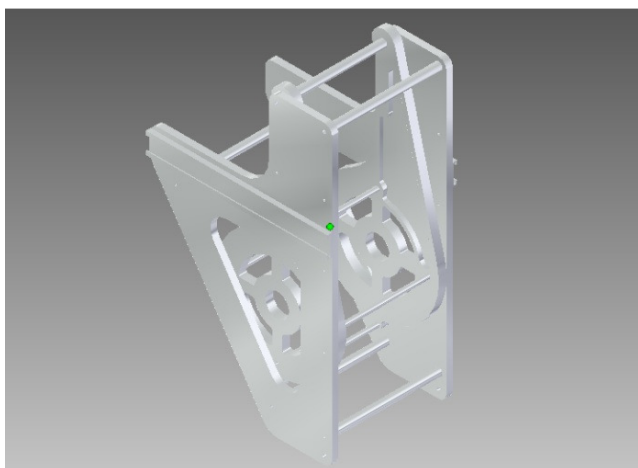


Figura 5.13: Cadera exterior derecha y Cadera interior derecha

CADERA	
Material	Al 2024 T-351
Densidad	2712kg/m ³
Masa	3,101kg
Volumen	1143339,429mm ³
Area de superficie	10610,07mm ²
Largo	23cm
Ancho	16,5cm
Alto	36,5cm

Tabla 5.3: Propiedades de la cadera

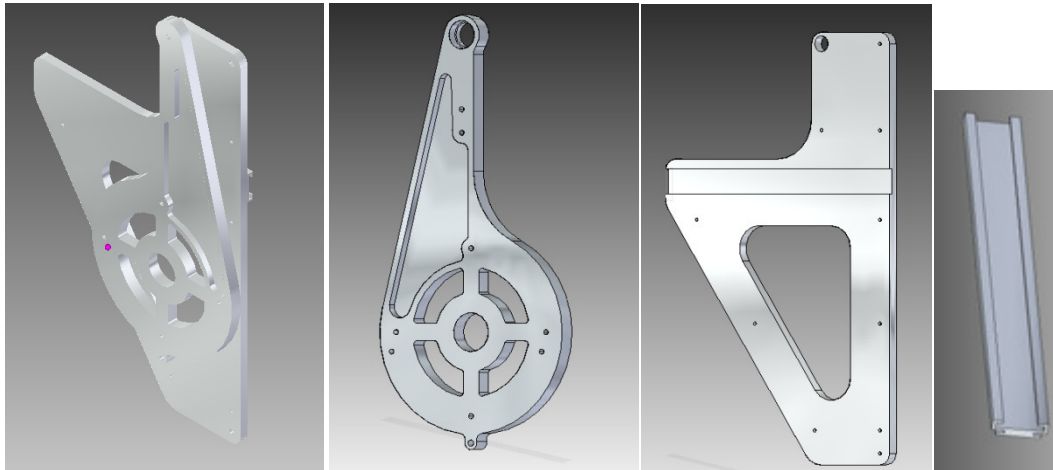


Figura 5.14: Diferentes vistas de la cadera

Manivela:

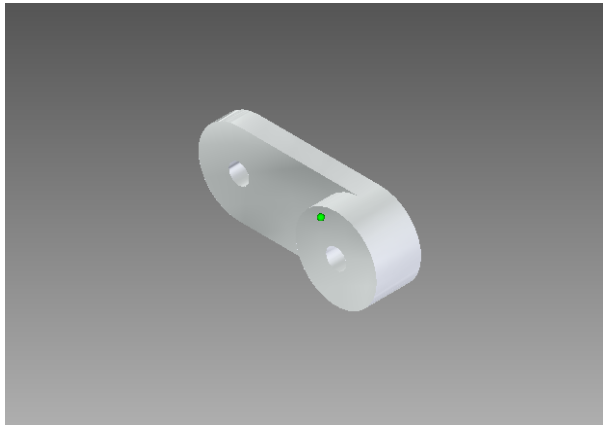


Figura 5.15: Manivela

Distancia entre centros 3cm

MANIVELA	
Material	Al 2024 T-351
Densidad	2712kg/m ³
Masa	0,017kg
Volumen	6141,593mm ³
Area de superficie	2992,26mm ²
Largo	5cm
Ancho	0,5 y 1,1 cm
Alto	2cm

Tabla 5.4: Propiedades de la manivela

Biela:

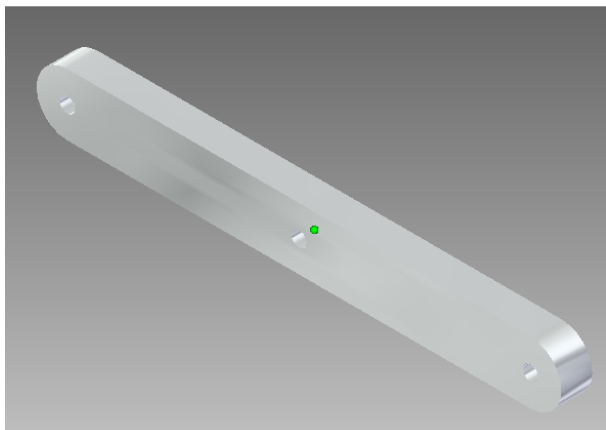


Figura 5.16: Biela

Distancia entre agujeros 7,5cm y 7,5cm

BIELA	
Material	Al 2024 T-351
Densidad	2712kg/m ³
Masa	0,088kg
Volumen	32552,544mm ³
Area de superficie	10610,07mm ²
Largo	17cm
Ancho	1cm
Alto	2cm

Tabla 5.5: Propiedades de la biela

Balancín:

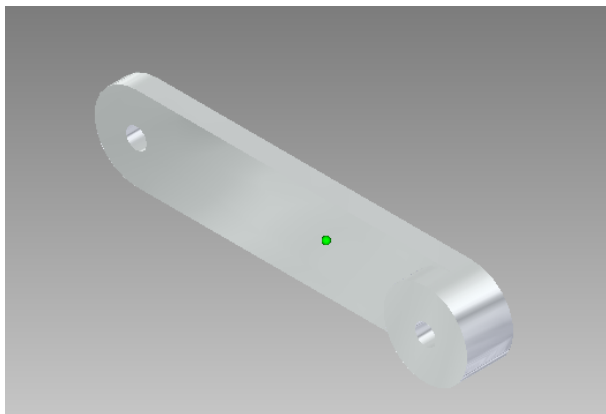


Figura 5.17: Balancín

Distancia entre agujeros 7,5cm

BALANCIN	
Material	Al 2024 T-351
Densidad	2712kg/m ³
Masa	0,029kg
Volumen	10641,593mm ³
Area de superficie	5242,26mm ²
Largo	9,5cm
Ancho	0,5 y 1,1cm
Alto	2cm

Tabla 5.6: Propiedades del balancín

Estabilizador:

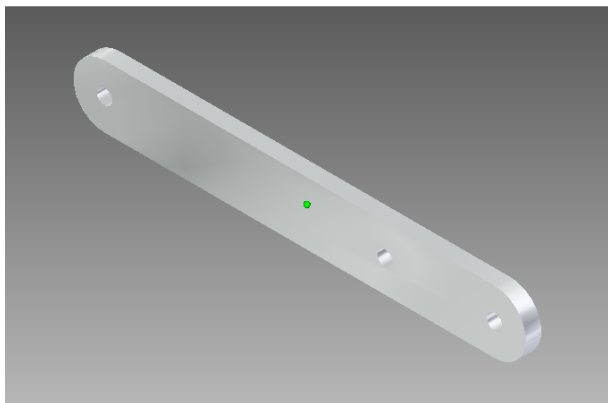


Figura 5.18: Estabilizador

Distancia entre centros 9cm y 3,5cm

ESTABILIZADOR	
Material	Al 2024 T-351
Densidad	2712kg/m ³
Masa	0,037kg
Volumen	13776,272mm ³
Area de superficie	7310,29mm ²
Largo	13,5cm
Ancho	0,5cm
Alto	2cm

Tabla 5.7: Propiedades del estabilizador

Deslizadera:

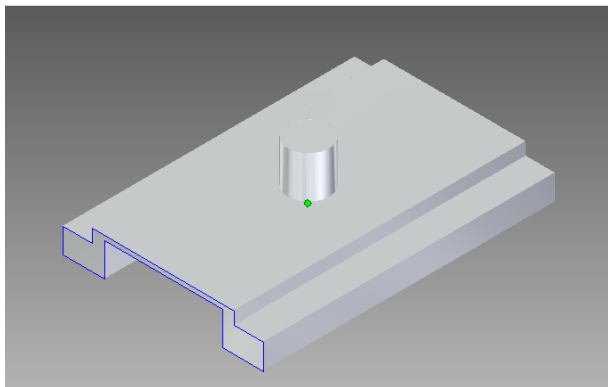


Figura 5.19: Deslizadera

DESLIZADERA	
Material	Al 2024 T-351
Densidad	2712kg/m ³
Masa	0,004kg
Volumen	1521,751mm ³
Area de superficie	2434,89mm ²
Largo	3,5cm
Ancho	2,4cm
Alto	0,95cm

Tabla 5.8: Propiedades de la deslizadera

Fémur:

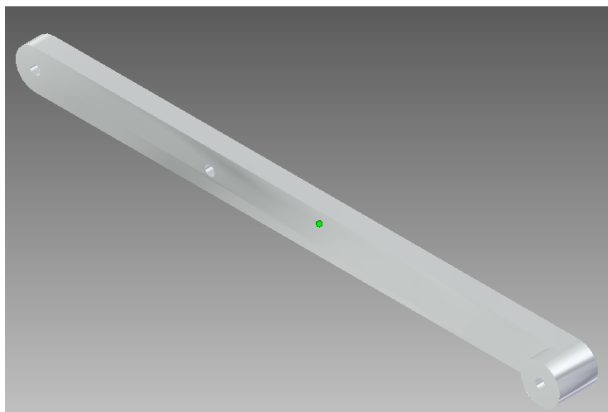


Figura 5.20: Fémur

Distancia entre centros 9cm y 18cm

FEMUR	
Material	Al 2024 T-351
Densidad	2712kg/m ³
Masa	0,161kg
Volumen	59497,787mm ³
Area de superficie	18595,46mm ²
Largo	29cm
Ancho	1 y 2 cm
Alto	2cm

Tabla 5.9: Propiedades del fémur

Contrafémur:

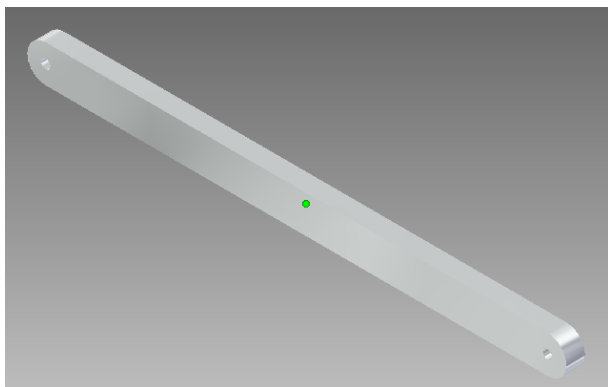


Figura 5.21: Contrafémur

Distancia entre agujeros de 27cm

CONTRAFEMUR	
Material	Al 2024 T-351
Densidad	2712kg/m ³
Masa	0,154kg
Volumen	56748,894mm ³
Area de superficie	17692,26mm ²
Largo	29cm
Ancho	1cm
Alto	2cm

Tabla 5.10: Propiedades del contrafémur

Tendón superior:

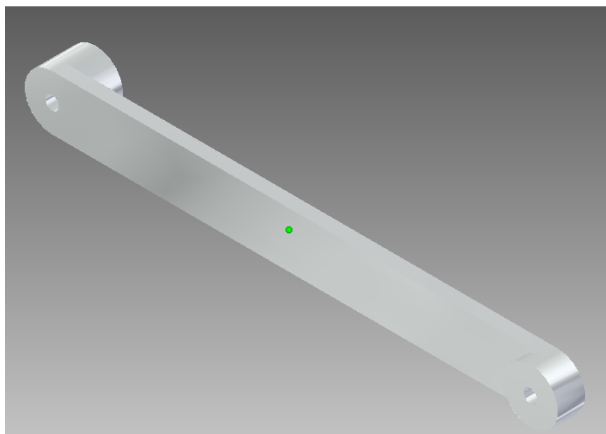


Figura 5.22: Tendón superior

Distancia entre centros de agujeros 18

<i>TENDON SUPERIOR</i>	
Material	Al 2024 T-351
Densidad	2712kg/m ³
Masa	0,065kg
Volumen	24086,84mm ³
Area de superficie	11277,65mm ²
Largo	20cm
Ancho	1,6 y 1cm
Alto	2cm

Tabla 5.11: Propiedades del tendón superior

Tendón inferior:

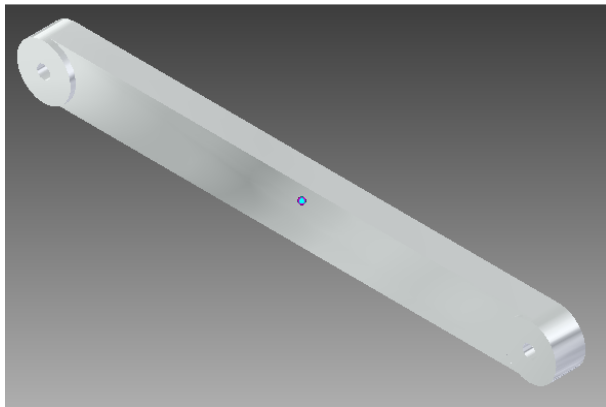


Figura 5.23: Tendón inferior

Distancia entre centros de agujeros 18cm

<i>TENDON INFERIOR</i>	
Material	Al 2024 T-351
Densidad	2712kg/m ³
Masa	0,107kg
Volumen	39632,5mm ³
Area de superficie	12527,9mm ²
Largo	20cm
Ancho	1,2 y 1cm
Alto	2cm

Tabla 5.12: Propiedades del tendón inferior

Rodilla:

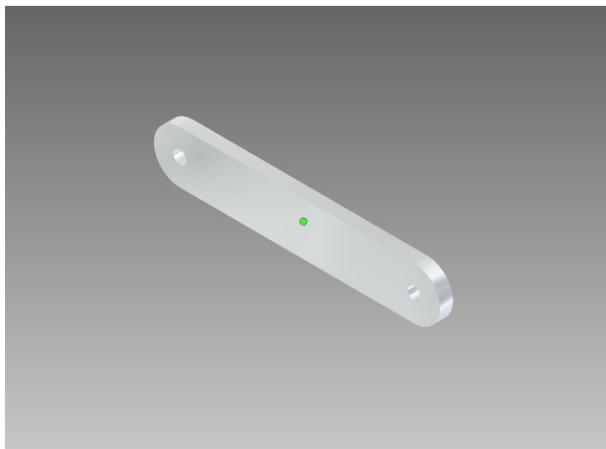


Figura 5.24: Rodilla

Distancia entre agujeros 9cm

RODILLA	
Material	Al 2024 T-351
Densidad	2712kg/m ³
Masa	0,028kg
Volumen	10374,45mm ³
Area de superficie	5521,02mm ²
Largo	11cm
Ancho	1cm
Alto	2cm

Tabla 5.13: Propiedades de la rodilla

Tibia:

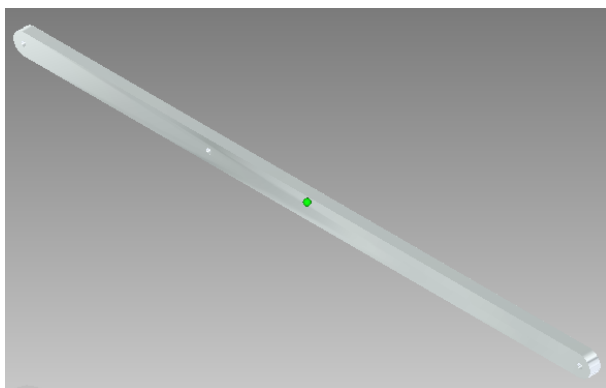


Figura 5.25: Tibia

Distancia entre centros de agujeros 18cm y 36cm

TIBIA	
Material	Al 2024 T-351
Densidad	2712kg/m ³
Masa	0,3kg
Volumen	110552,54mm ³
Area de superficie	34010,07mm ²
Largo	56cm
Ancho	1cm
Alto	2cm

Tabla 5.14: Propiedades de la tibia

Peroné:

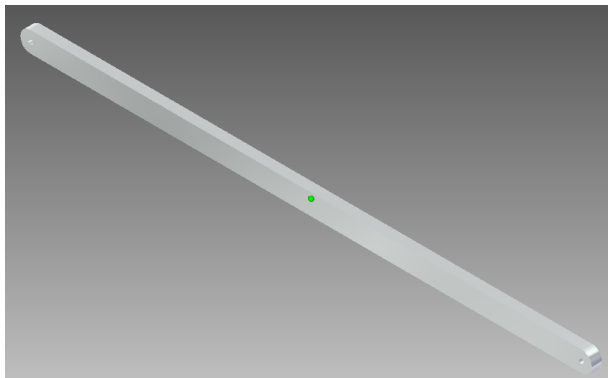


Figura 5.26: Peroné

Distancia entre agujeros 54cm

PERONE	
Material	Al 2024 T-351
Densidad	2712kg/m ³
Masa	0,3kg
Volumen	110748,9mm ³
Area de superficie	33892,26mm ²
Largo	56cm
Ancho	1 cm
Alto	2cm

Tabla 5.15: Propiedades del peroné

Pie:

PIE IZQUIERDO

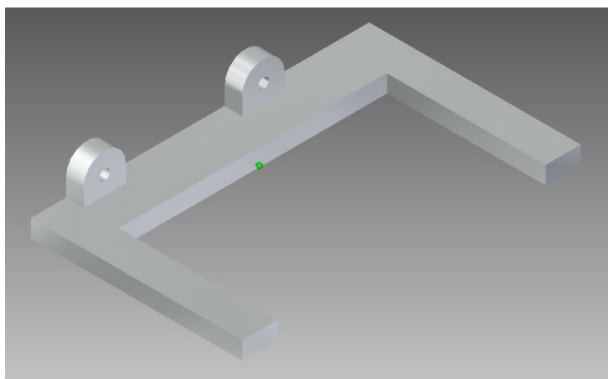


Figura 5.27: Pie izquierdo

Distancia entre centros de agujeros 9cm

PIE IZQUIERDO	
Material	Al 2024 T-351
Densidad	2712kg/m ³
Masa	0,278kg
Volumen	102358,4mm ³
Area de superficie	29562mm ²
Largo	19,2cm
Ancho	12cm
Alto	3,2cm

Tabla 5.16: Propiedades del pie izquierdo

PIE DERECHO

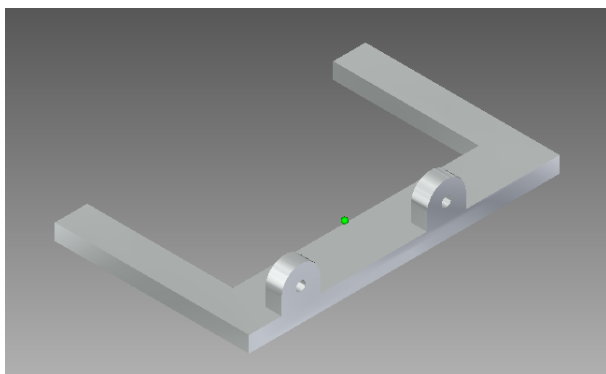


Figura 5.28: Pie derecho

Distancia entre centros de agujeros 9cm

<i>PIE DERECHO</i>	
Material	Al 2024 T-351
Densidad	2712kg/m ³
Masa	0,278kg
Volumen	102358,4mm ³
Area de superficie	29562mm ²
Largo	19,2cm
Ancho	12cm
Alto	3,2cm

Tabla 5.17: Propiedades del pie derecho

En el estudio actual del Pasibot no se tienen en cuenta las fricciones con el suelo, ni las sufridas en las uniones entre eslabones debido al rozamiento generado en las juntas, es por ello que el objeto del presente proyecto es dotar al modelo de estas restricciones dentro del entorno computacional de MSC Adams.

Para ello el estudio se centrara en los modelos elaborados por José Manuel Jiménez Crespo en su Proyecto: Análisis y Simulación del Robot Bípedo Pasibot:

- Modelo colgado, se trata del modelo simplificado para Adams, presentes los elementos comunes y integrados el motor y las juntas como elementos de MSC Adams, en el cual no se presenta suelo sobre el que se apoya el Pasibot. El Pasibot esta fijado en su CDG y por tanto se mueve sin las restricciones que provocaría el contacto con el suelo, este modelo sirve para estudiar el comportamiento del Pasibot ante la fricción en las juntas.

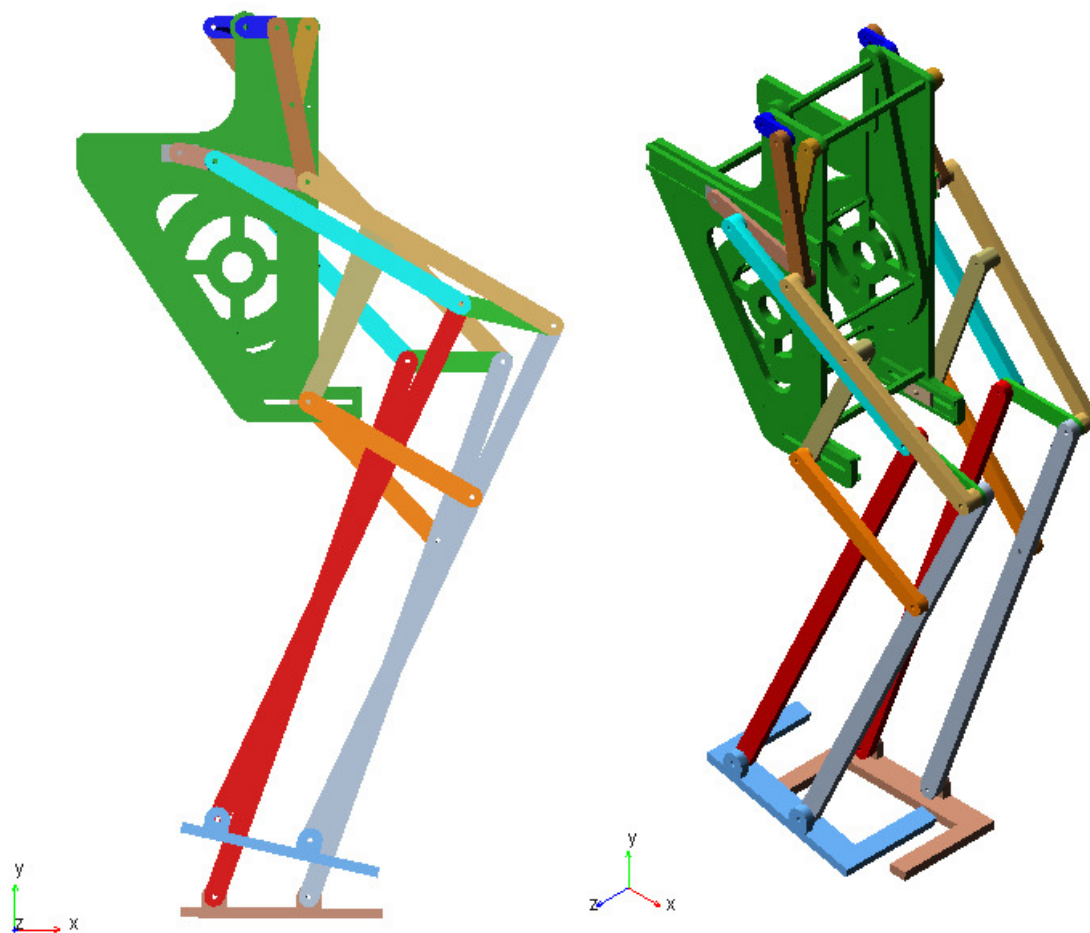


Figura 5.29: Modelo colgado

- Modelo en suelo, se trata del modelo simplificado para Adams, presentes los elementos comunes y integrados el motor y las juntas como elementos de MSC Adams, con la inclusión del elemento suelo sobre el que camina el Pasibot. El Pasibot sigue una trayectoria rectilínea por el suelo y contactando con este mismo. Este modelo sirve para estudiar el comportamiento del Pasibot en condiciones de uso estándar.

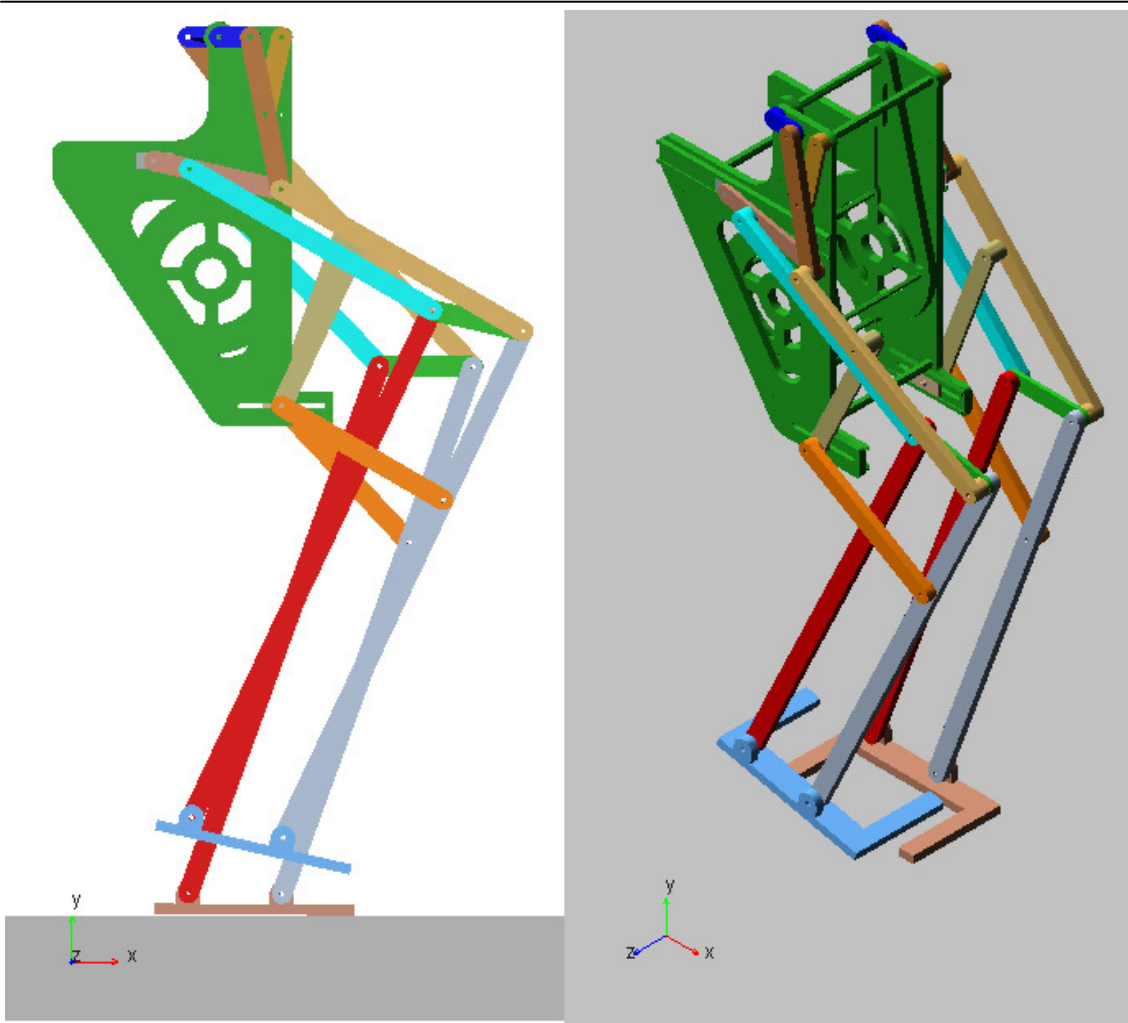


Figura 5.30: Modelo en suelo

Se valora que el Pasibot de partida no está sometido a ninguna restricción de rozamiento salvo en el caso del modelo en suelo del contacto con el suelo sin estar aplicado el rozamiento debido al mismo. Por tanto las fuerzas generadas serán analizadas teniendo en cuenta la inclusión de juntas giratorias, juntas traslacionales y el suelo.

El Pasibot, es un mecanismo complejo, se procede a realizar el estudio de la fricción en MSC Adams con mecanismos simples y ejemplos que son repetibles de forma sencilla y matemática.

5.4 ESTUDIO DE CONTACTO EN MSC ADAMS

Para poder tratar de manera simple cómo afectan tanto la fricción en las juntas, como los distintos tipos de impacto, se han creado dos metodologías de ensayo diferentes.

En los anteriores modelos de Pasibot, los estudios realizados no tenían en cuenta los distintos tipos de contacto que podían sucederse entre el robot y la superficie sobre la cual éste camina. Era necesario establecer un tipo de contacto entre el robot y el suelo, más que nada para que el robot no “atravesase” el suelo una vez comenzada la simulación. Por este motivo se dotaba al robot y al suelo de fuerza de contacto.

Esto no quiere decir que se utilizase una u otra por alguna razón. Se utilizaba la que venía por defecto en el programa, sin entrar en valoraciones de qué comportamiento podía suponer la elección de una u otra, motivo por sobre el cual se centrará el presente proyecto.

En la primera, se evaluará cómo afectan los distintos tipos de impacto del elemento sobre una superficie cualquiera. Para ello se ha tratado el tema de una manera muy sencilla. Se ha simulado una bola a la que se le aplica una velocidad inicial en el eje x. Cuando llegue al suelo, se estudiará cómo se comporta esta bola dependiente de la tipología de contacto definida (ver figura 5.30)

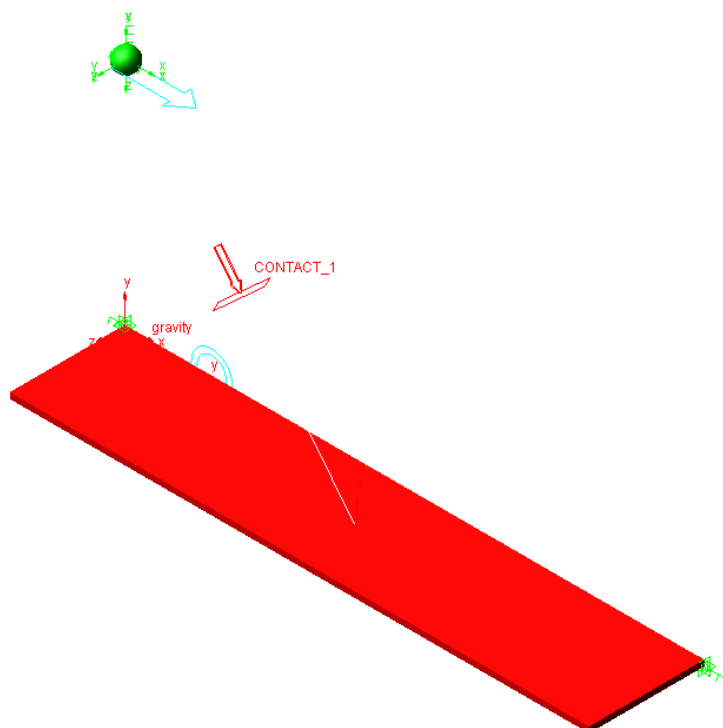


Figura 5.31: Simulación para el estudio del contacto

5.4.1 COMPORTAMIENTO DE LA BOLA CONTACTO TIPO “IMPACT”

Al realizar la simulación, y partiendo con las condiciones que aparecen por defecto en el programa, la bola cae con normalidad hasta que entra en contacto con el suelo. Una vez establecido el contacto la bola comienza a rodar siguiendo el sentido de la velocidad aplicada. No se produce ningún tipo de rebote por parte de la pelota.

Se intentan modificar los valores establecidos por defecto en el programa, pero ni aún así se produce algún cambio más allá de lo mostrado anteriormente. La bola impacta con el suelo e inmediatamente comienza a rodar. La velocidad de la bola permanece constante a lo largo de todo el recorrido.

El valor que aparece por defecto en la amortiguación es de 10. El programa recomienda como regla que el coeficiente de amortiguación sea de aproximadamente el uno por ciento del coeficiente de rigidez. Por tanto, si el coeficiente de rigidez establecido es de 10^5 , el coeficiente de amortiguación será por tanto de 10^3 .

Se realiza una simulación para ambos valores de coeficiente de amortiguación, tanto para 10 como para 103, no obteniéndose diferencia alguna entre ambos casos.

5.4.2 COMPORTAMIENTO DE LA BOLA CONTACTO TIPO “RESTITUTION”

Al seleccionar como tipo de contacto restitution, aparecen dos parámetros a tener en cuenta: el penalty y el propio coeficiente de restitución. Para esta simulación se ha tomado un valor de penalty igual a 10^6 , que es el valor recomendado por el programa para sistemas modelados en el Sistema Internacional

En la siguiente gráfica se representan los valores del desplazamiento de la bola en el eje y (vertical) en función del tiempo para distintos valores de coeficiente de restitución.

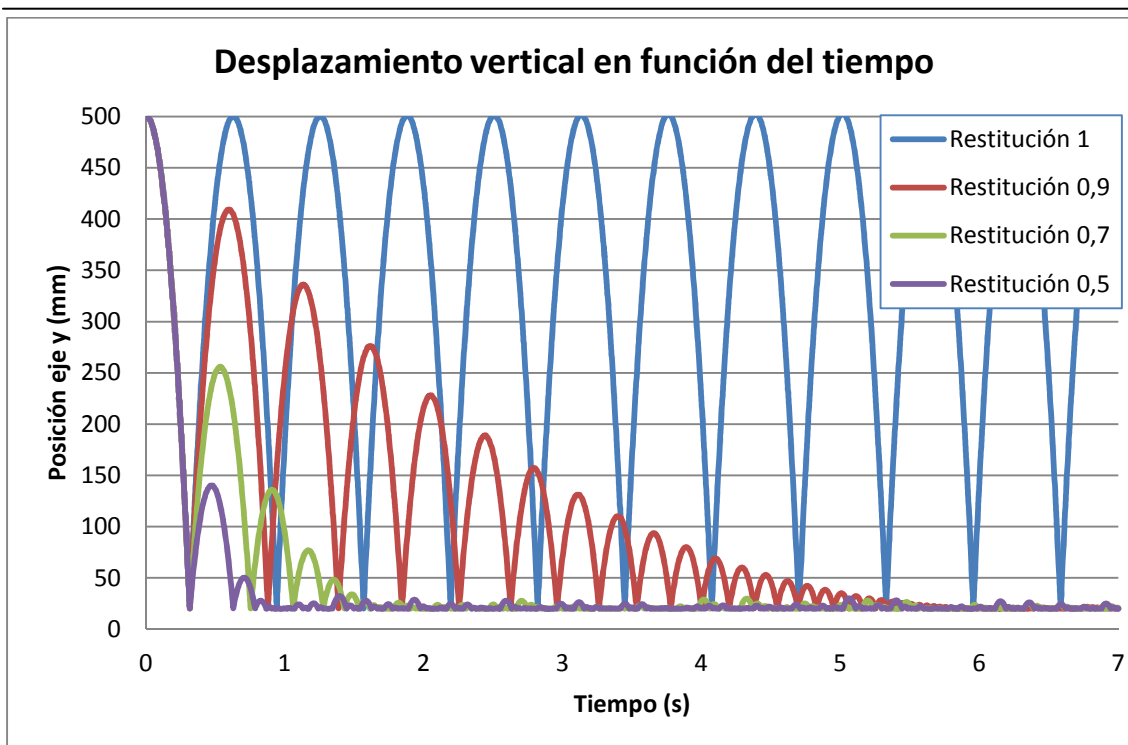


Gráfico 5.1: Desplazamiento vertical de la bola en función del tiempo

El coeficiente de restitución es una medida del grado de conservación de la energía cinética en un choque entre partículas clásicas. Dicho coeficiente toma valores entre 0 y 1. El valor 1 se da en un choque perfectamente elástico, donde se conserva tanto el momento lineal como la energía cinética del sistema. El valor 0 se da en un choque perfectamente inelástico (o plástico) donde sólo se conserva el momento lineal.

Así pues, de acuerdo a la gráfica obtenida, para un coeficiente de restitución igual a la unidad, la pelota tiene un choque perfectamente elástico, por lo que el desplazamiento vertical una vez rebotada es el mismo. Sigue un desplazamiento periódico. A medida que va disminuyendo el coeficiente de restitución, la pelota pierde energía en el choque, por lo que una vez que ésta sale rebotada alcanza una altura menor, y así sucesivamente hasta rodar sobre la superficie.

En la simulación anterior no se ha tenido en cuenta el rozamiento que sufre la pelota con la superficie, para lo cual en “Friction Force” se seleccionará Coulomb. Una vez seleccionado Coulomb aparecen varios parámetros entre los que se encuentran los coeficientes estáticos y dinámicos. Se estudiará la influencia de estos dos coeficientes en el desplazamiento vertical de la pelota.

Para ello, se partirá de un coeficiente de restitución de 0.85, que es el coeficiente que establece el programa para contacto entre aluminio en seco y acero en seco (ver tabla 5.1). Se toman estas condiciones para los materiales como semejanza al Pasibot (aluminio en seco) y la superficie sobre la cual éste avanza (acero en seco).

Material 1	Material 2	Mu static	Mu dynamic	Restitution coefficient
Dry steel	Dry steel	0.70	0.57	0.80
Greasy steel	Dry steel	0.23	0.16	0.90
Greasy steel	Greasy steel	0.23	0.16	0.90
Dry aluminium	Dry steel	0.70	0.50	0.85
Dry aluminium	Greasy steel	0.23	0.16	0.85
Dry aluminium	Dry aluminium	0.70	0.50	0.85
Greasy aluminium	Dry steel	0.30	0.20	0.85
Greasy aluminium	Greasy steel	0.23	0.16	0.85
Greasy aluminium	Dry aluminium	0.30	0.20	0.85
Greasy aluminium	Greasy aluminium	0.30	0.20	0.85
Acrylic	Dry steel	0.20	0.15	0.70
Acrylic	Greasy steel	0.20	0.15	0.70
Acrylic	Dry aluminium	0.20	0.15	0.70
Acrylic	Greasy aluminium	0.20	0.15	0.70
Acrylic	Acrylic	0.20	0.15	0.70
Nylon	Dry steel	0.10	0.06	0.70
Nylon	Greasy steel	0.10	0.06	0.70
Nylon	Dry aluminium	0.10	0.06	0.70
Nylon	Greasy aluminium	0.10	0.06	0.70
Nylon	Acrylic	0.10	0.06	0.65
Nylon	Nylon	0.10	0.06	0.70
Dry rubber	Dry Steel	0.80	0.76	0.95
Dry rubber	Greasy steel	0.80	0.76	0.95

Dry rubber	Dry aluminium	0.80	0.76	0.95
Dry rubber	Greasy aluminium	0.80	0.76	0.95
Dry rubber	Acrylic	0.80	0.76	0.95
Dry rubber	Nylon	0.80	0.76	0.95
Dry rubber	Dry rubber	0.80	0.76	0.95
Greasy rubber	Dry steel	0.63	0.56	0.95
Greasy rubber	Greasy steel	0.63	0.56	0.95
Greasy rubber	Dry aluminium	0.63	0.56	0.95
Greasy rubber	Greasy aluminium	0.63	0.56	0.95
Greasy rubber	Acrylic	0.63	0.56	0.95
Greasy rubber	Nylon	0.63	0.56	0.95
Greasy rubber	Dry rubber	0.63	0.56	0.95
Greasy rubber	Greasy rubber	0.63	0.56	0.95

Tabla 5.18: Parámetros de contacto “Impact” en función de los materiales empleados

Así pues, en la siguiente gráfica (Gráfico 5.2) se establece la diferencia entre que aparezcan o no rozamientos en la simulación. Para ello se ha tomado un coeficiente de restitución de 0,85.

Se ha procedido a simular tanto para unos coeficientes de 0,70 y 0,50 de μ estática y μ dinámica, respectivamente como para unos valores sensiblemente inferiores que son 0,5 y 0,3.

Se observa cómo al intervenir la fuerza de fricción de coulomb, el desplazamiento que sufre la bola verticalmente hacia arriba es cada vez menor, fruto del rozamiento producido al entrar en contacto con la superficie, suponiendo la pérdida de energía cinética en el choque y por lo tanto un menor ascenso. Cuantos mayores son los coeficientes tanto estático como dinámico, menor es el desplazamiento vertical de la bola en función del tiempo.

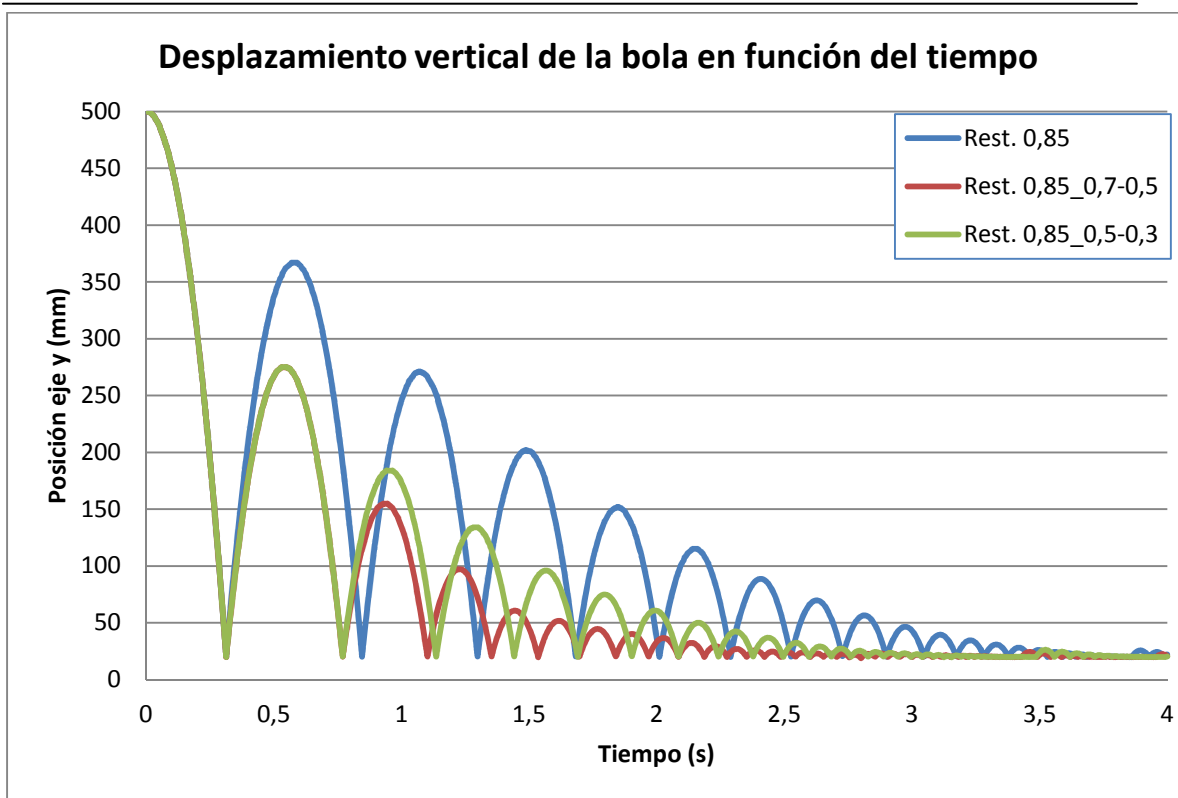


Gráfico 5.2 - Desplazamiento vertical de la bola en función del tiempo variando el rozamiento

5.5 ESTUDIO DE FRICCIÓN EN MSC ADAMS

Una vez estudiados los distintos tipos de fuerza de contacto que se pueden producir, se procederá a realizar un estudio acerca de las fricciones que se van a encontrar en el robot.

El robot estudiado en anteriores proyectos carece de fricción en las juntas.

Como ha sido enunciado anteriormente, hay dos tipos de juntas que se encuentran presente en el robot: rotacionales y traslacionales.

Para un mejor entendimiento de cada una de las juntas, se ha creado en el programa ADAMS un modelo muy sencillo en el cual aparezcan representadas tanto las juntas rotacionales como las traslacionales (Figura 5.32). Consta de una manivela unida en uno de sus extremos por un eslabón. De ese mismo eslabón en el otro extremo hay unido a su vez otro elemento de forma cuadrangular, que se desplaza traslacionalmente sobre el suelo.

En el movimiento traslacional que realiza la pieza de forma rectangular respecto a la superficie habrá una junta traslacional, mientras que la unión de la manivela con el eslabón y la del eslabón con el elemento cuadrangular presentarán juntas de rotación.

El modelo descrito anteriormente es el siguiente:

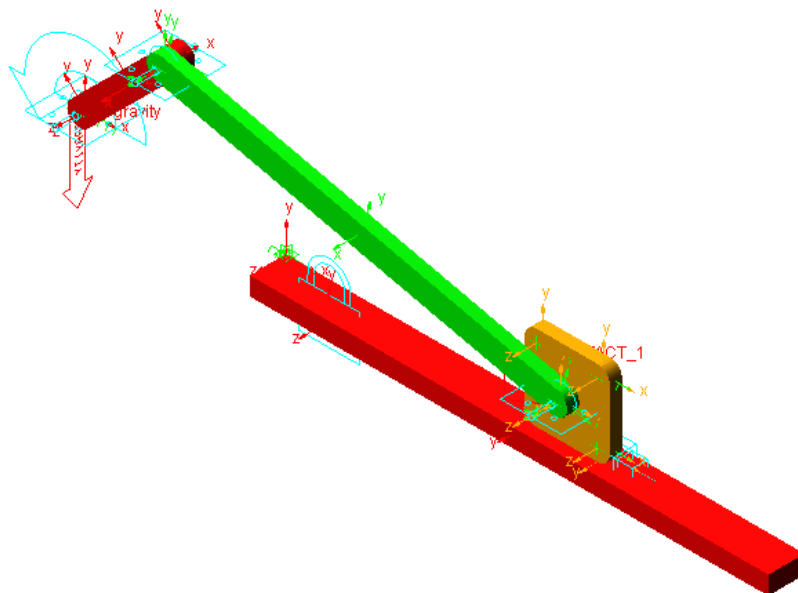


Figura 5.32: Simulación sencilla para el estudio de fricciones sólo con las juntas

Tras la colocación de las juntas de revolución y traslación, se implementan las fricciones en cada una de ellas, quedando el modelo representativo de la siguiente manera (Figura 5.33):

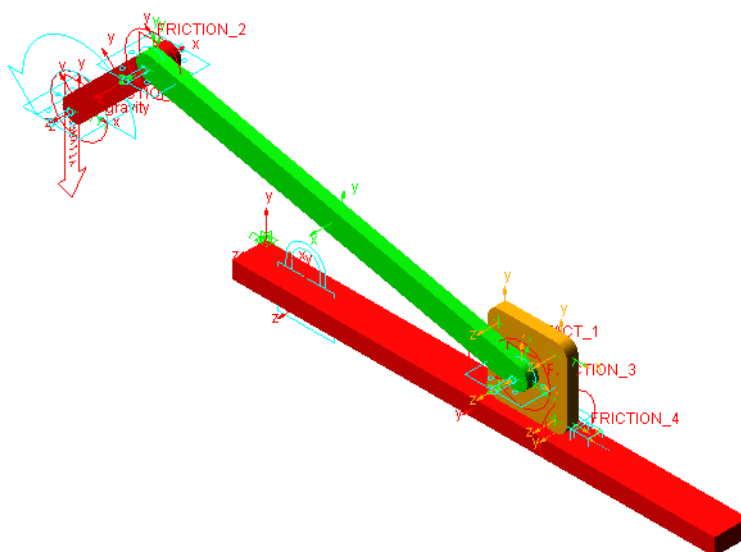


Figura 5.33: Simulación sencilla para el estudio de fricciones sólo con las juntas con fricción

A la manivela se le aplica una velocidad de giro inicial de 360° por segundo.

El par obtenido en la manivela en función del tiempo, sin haber aplicado fricción alguna en cualquiera de sus juntas es el siguiente:

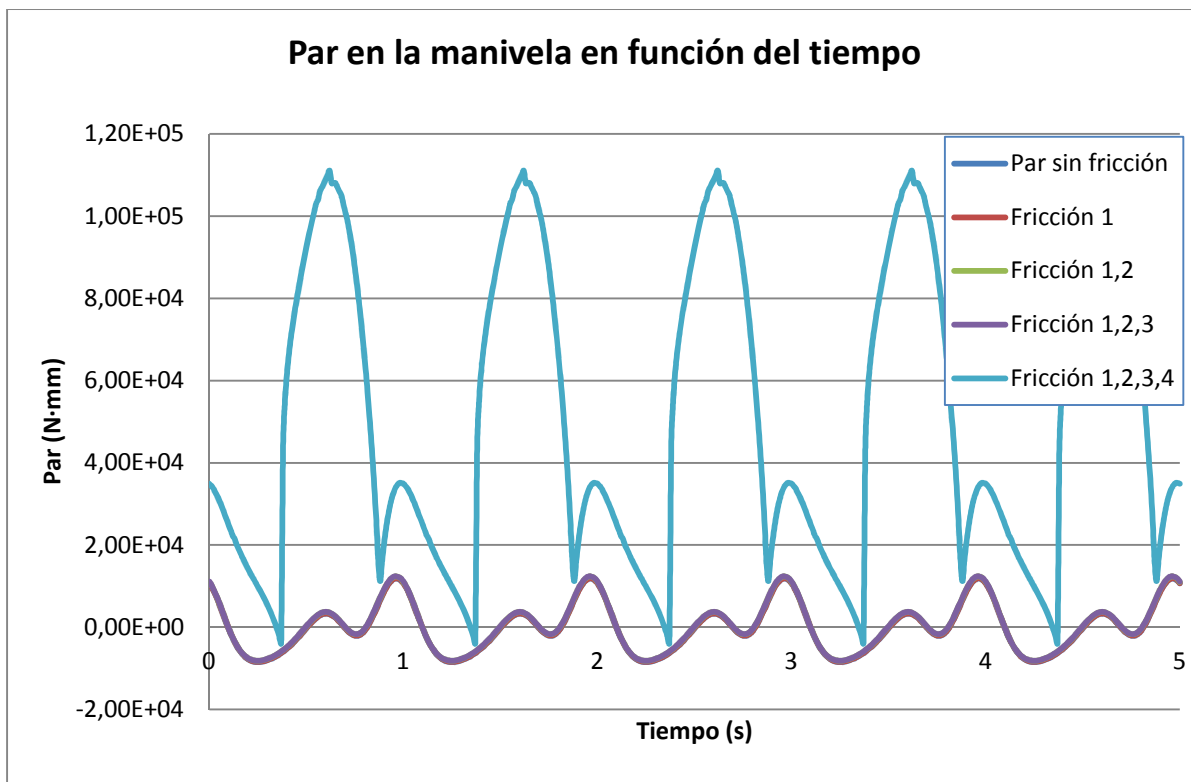


Gráfico 5.3: Par en la manivela según la implementación de fricciones a las juntas

Como se ve en la imagen anterior, se han ido finalmente son 4 fricciones las que hay en el modelo. Para ver cómo afectan las fricciones en el par de la manivela, se han ido incorporando paulatinamente a la simulación. De tal forma que primero se ha simulado con la fricción en la primera junta, luego se ha añadido la fricción en la segunda junta y así hasta llegar a la cuarta y última junta, la de traslación.

En la gráfica no se aprecia por solaparse, pero los resultados obtenidos en todos los casos menos para la fricción en todos los puntos han sido prácticamente idénticos. El cambio se debe a la fricción que ocasiona la junta traslacional.

Los valores tomados para la fricción son los que aparecen por defecto en el programa.

No puede ser que los resultados obtenidos conforme se van añadiendo fricciones sea el mismo, y que éste cambio sólo se vea influenciado por la fricción en la junta traslacional. Se revisan de nuevo los datos de partida y se modifican, concretamente el valor del radio del bulón “pin radius” y se pone el valor que tiene el radio del bulón del Pasibot, para asemejarlo a esta simulación, cuyo valor es de 25 mm. El resto de valores se dejan por defecto.

Se procederá a hacer la simulación con los valores por defecto, siendo los de la fricción dinámica de 0,5 y estática de 0,3. Los resultados obtenidos son los siguientes:

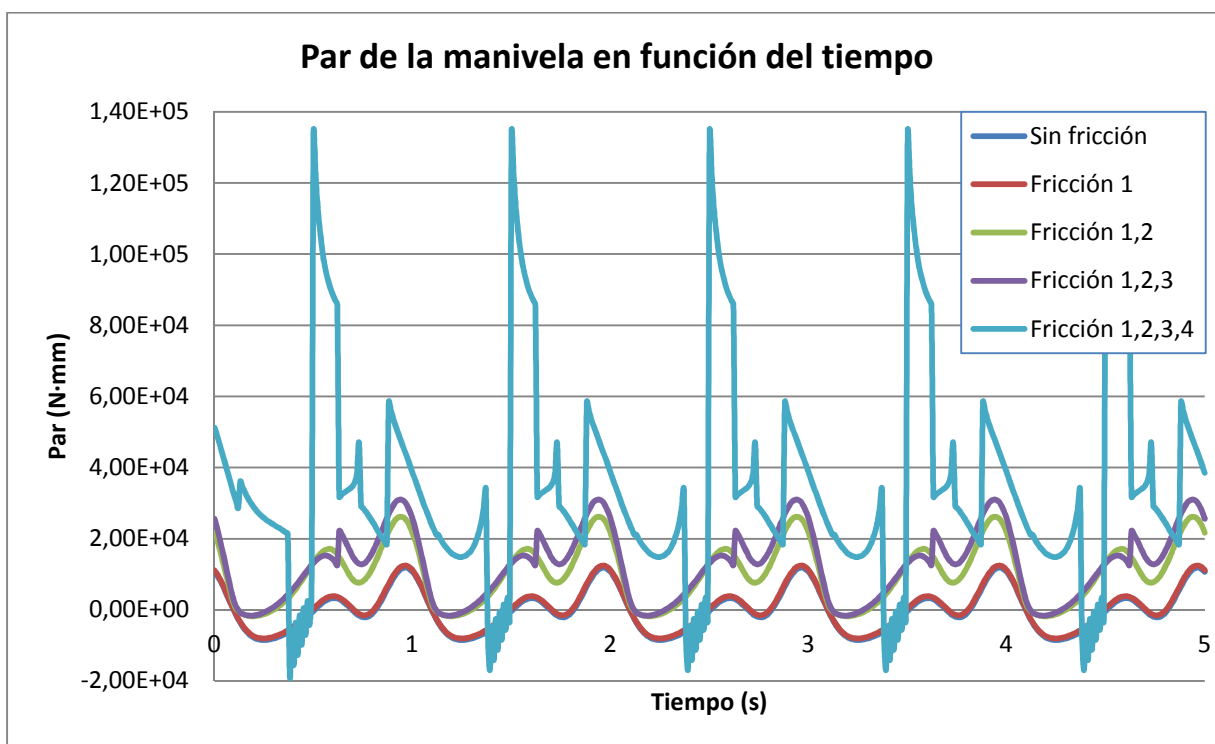


Gráfico 5.4: Par en la manivela según la implementación de fricciones a las juntas corrigiendo el bulón

En este caso, si que se aprecian diferencias entre todos los casos, exceptuando los casos en los que no hay fricción en ninguna de las juntas y si que la hay en la manivela, donde el par obtenido sufre una variación mínima.

Para apreciar mejor la diferencia entre los casos, se acotará el tiempo de estudio en un segundo (Gráfico 5.5).

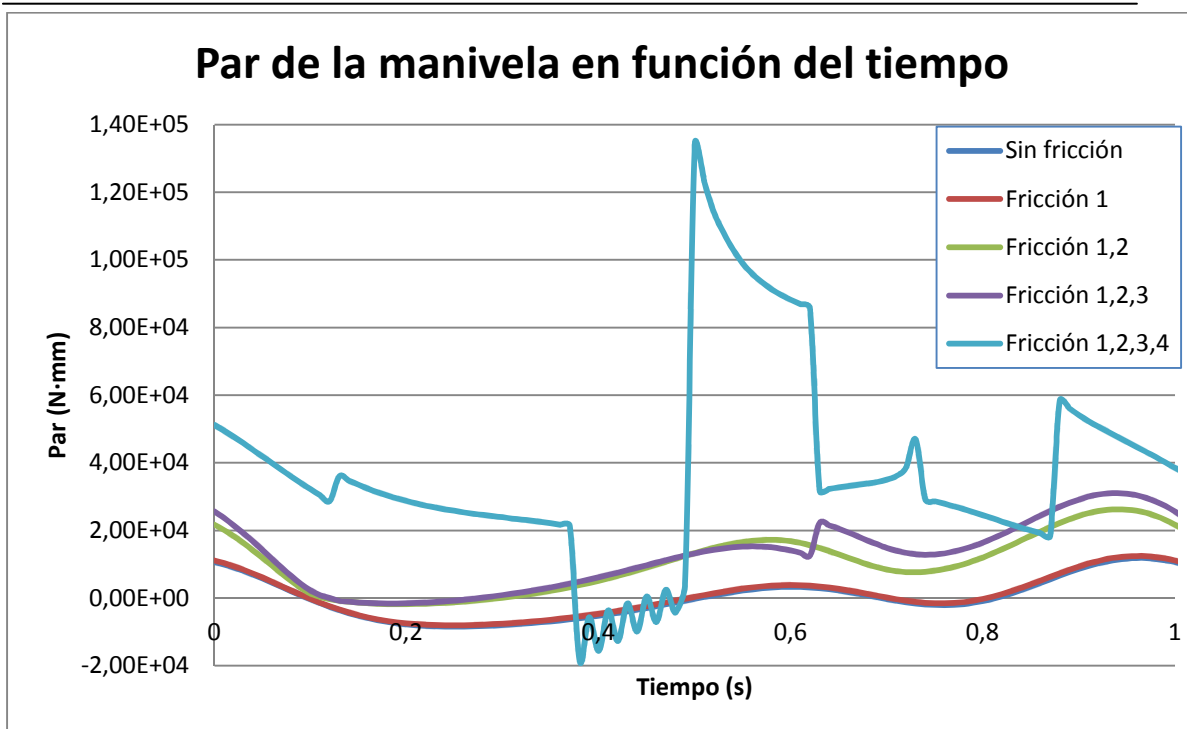


Gráfico 5.5: Par en la manivela según la implementación de fricciones a las juntas en 1 segundo

En esta ocasión, si que se aprecian diferencias en el par, por lo que se llega a la conclusión que el radio del bulón es un parámetro muy importante que hay que tener en cuenta la implementación de las fricciones en las juntas. En la gráfica anterior el radio del bulón que aparecía por defecto era de 1 mm, por lo que no había apreciación alguna en la variación del par conforme se añadían fricciones a la simulación. En este caso, para un valor del radio del bulón de 25 mm (se toma el mismo valor que tiene el Pasibot) se ve cómo a medida que se le implementan fricciones a la simulación, se produce un aumento del par.

Se aprecia cómo en la gráfica obtenida para la fricción en las juntas de rotación (1,2 y 3), el par aumenta a medida que se le van añadiendo fricciones en las respectivas juntas al mecanismo. Es cuando aparece la fricción de la junta de traslación (4) cuando la gráfica no sigue el patrón que ya siguieron anteriormente las de rotación y se comporta de manera totalmente diferente.

La aparición de la fricción en la junta 4 aumenta el par considerablemente y produce una gráfica escalonada con bastantes picos. Uno de los posibles motivos por los que se producen tantos picos en el último caso puede ser que la simulación se ha hecho con un tamaño de paso elevado. Concretamente para esta simulación se ha realizado con 0.01 de tamaño de paso, y durante un tiempo de 5 segundos.

Para ver si los picos se han podido producir por el alto tamaño de paso, se procederá a realizar la simulación con un tamaño de paso menor, concretamente de 0.005 segundos, es decir, la mitad.

Se confrontarán los datos obtenidos para los dos casos en la siguiente gráfica:

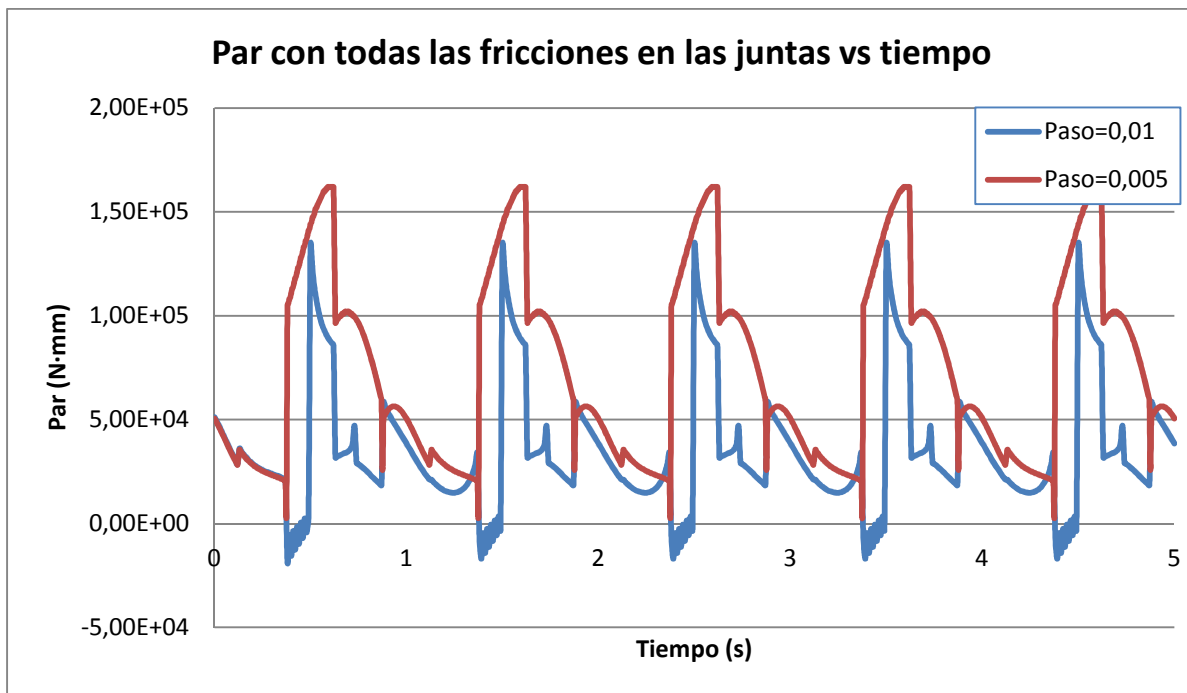


Gráfico 5.6: Par con todas las fricciones en las juntas y con distinto paso

Se vuelve a comprobar la simulación para un paso de 0,01 y el programa avisa de que hay un error en la simulación, aunque éste no obstante da como resultado lo representado anteriormente. Al disminuir el tamaño del paso en la simulación, el programa ya no avisa de ningún error, por lo que será ésta última la que se tomará como válida.

Finalmente la gráfica correcta del par de la manivela en función del tiempo, con fricción en todas las juntas y en un intervalo de tiempo de un segundo, es la siguiente:

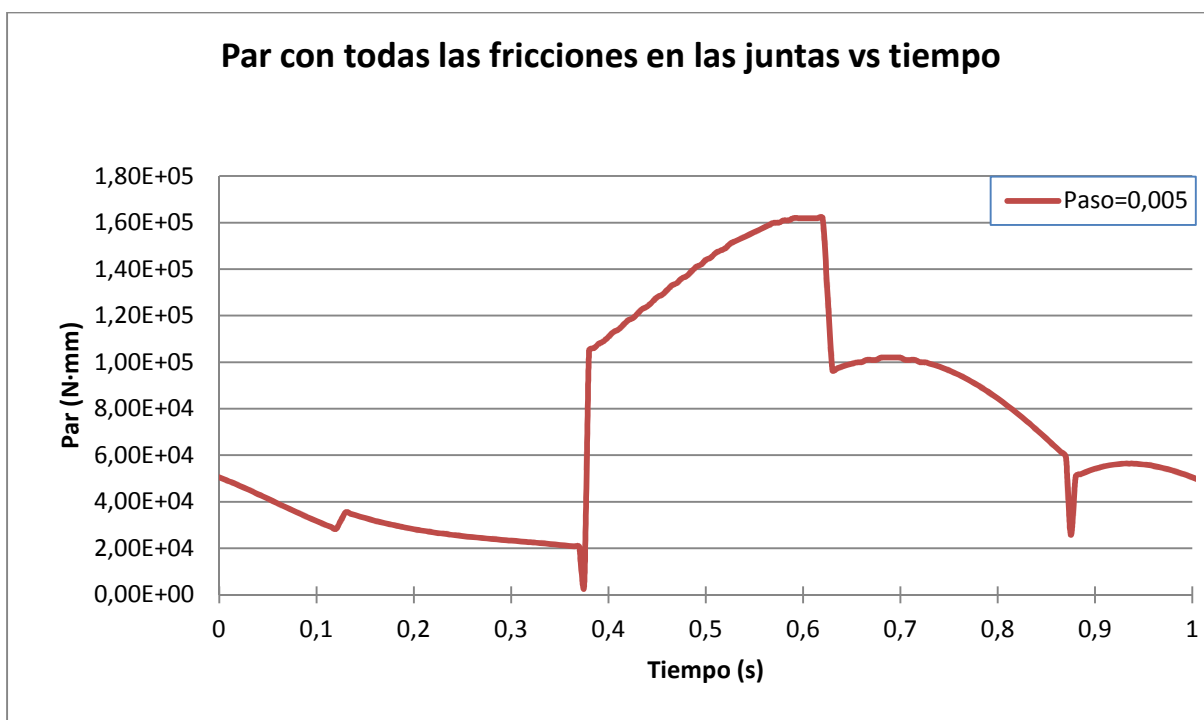


Gráfico 5.7: Par con todas las fricciones en las juntas en 1 segundo

En la gráfica se observan 4 saltos, en los instantes de tiempo siguientes:

- 0,12 s. Se produce cuando la manivela se encuentra en la posición vertical, en la parte de arriba, formando 90° con el eje x.

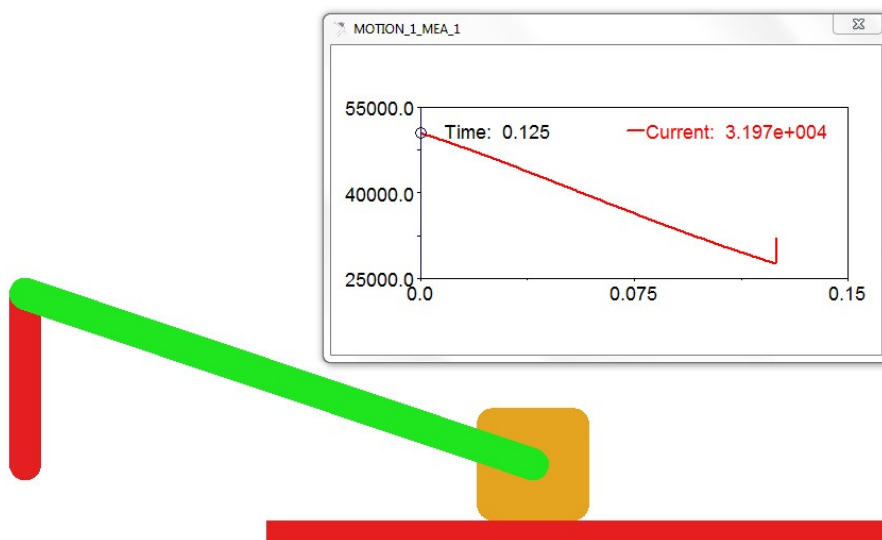


Figura 5.34: Manivela en posición vertical formando 90° con el eje X

- 0,375 s. Se produce cuando la manivela se encuentra en posición horizontal, formando 180° con el eje x.

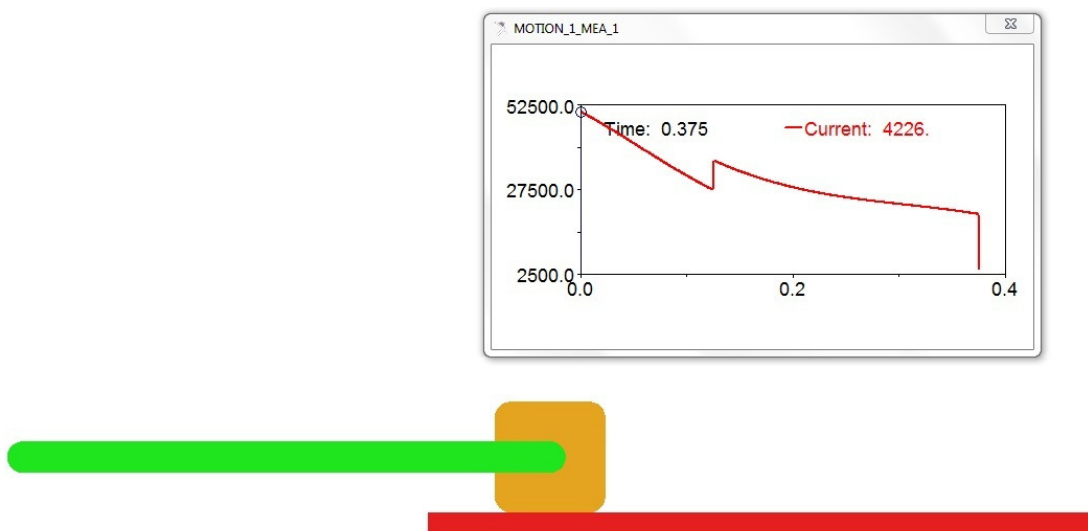


Figura 5.35: Manivela en posición vertical formando 180° con el eje X

- 0,63 s. Se produce cuando la manivela se encuentra en posición vertical, en la parte de abajo, formando 270° con el eje x.

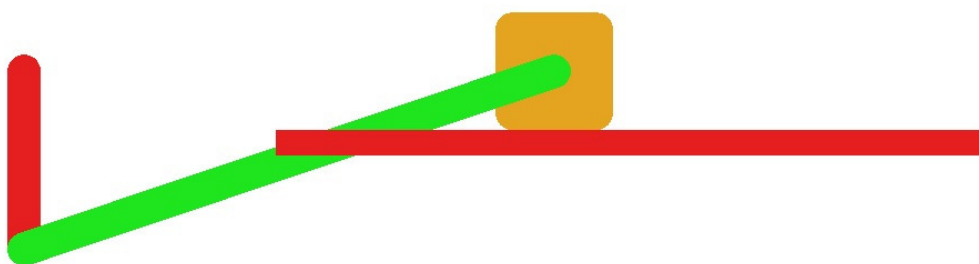
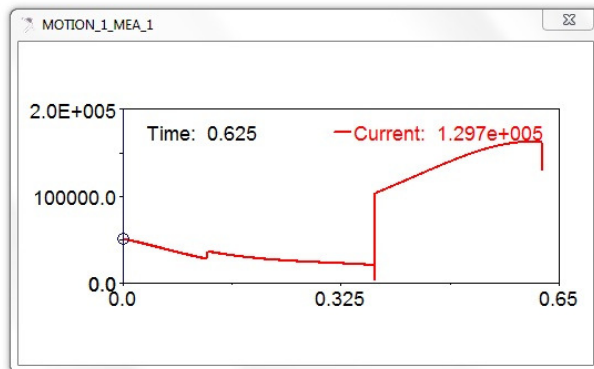


Figura 5.36: Manivela en posición vertical formando 270° con el eje X

- 0,875 s. Se produce cuando la manivela se encuentra en posición horizontal, formando 360° con el eje x.

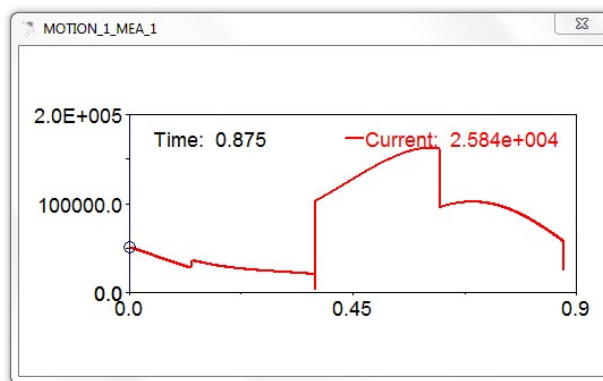


Figura 5.37: Manivela en posición vertical formando 360° con el eje X

Los saltos se producen aproximadamente cada 0,25 segundos, ya que en total la manivela tarda 1 segundo en realizar la vuelta completa.

Capítulo 6:

Análisis y resultados

6.1. ESTUDIO DE FRICCIÓN EN MODELO SIMPLIFICADO

Para el estudio de la fricción en el Pasibot, se parte de un modelo conocido en este caso los modelos: colgado y suelo. Como modelos simplificados y cuyo estudio cinético se ha llevado a cabo anteriormente, el análisis de fricciones se llevará a cabo implementando consecutivamente las restricciones a las que está sometido el mismo hasta llegar a un modelo que tenga en cuenta las restricciones debidas a las fuerzas por contacto entre eslabones y con el suelo.

El estudio se realiza a diferentes velocidades, para comprobar si la velocidad es una variable que suponga cambios en el comportamiento cinético y dinámico del modelo.

6.1.1 ANALISIS Y RESULTADOS: PASIBOT COLGADO

6.1.1.1 ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL MODELO

El estudio de fricciones en MSC Adams del modelo Pasibot colgado tendremos en cuenta las restricciones sufridas en la dinámica del Pasibot debido a la inclusión de las fricciones debidas a las juntas tanto traslacionales como rotacionales y los efectos que las juntas tienen sobre el Pasibot. En este punto debemos partir del modelo simplificado previamente estudiado.

En primer término se procede a su estudio cinemático para evitar conclusiones precipitadas sobre el efecto de la fricción debido a las juntas y tener una visión completa del proceso de inclusión de restricciones debido a fricciones. Para ello se revisan la estructura completa del Pasibot simplificado y se sitúan las juntas traslacionales que faltaban sobre el modelo; una vez se tiene el modelo con la totalidad de las juntas implementadas se procede a hacerlo correr y observar resultados cinemáticos.

Siendo los pies el último eslabón de la cadena cinemática del Pasibot y el elemento que realiza el juego de pies y por tanto la pisada y el avance horizontal del mecanismo, se procede analizar los movimientos verticales y horizontales a los que se ve sometidos ambos pies, en sus puntos más característicos, como son la punta y el talón.

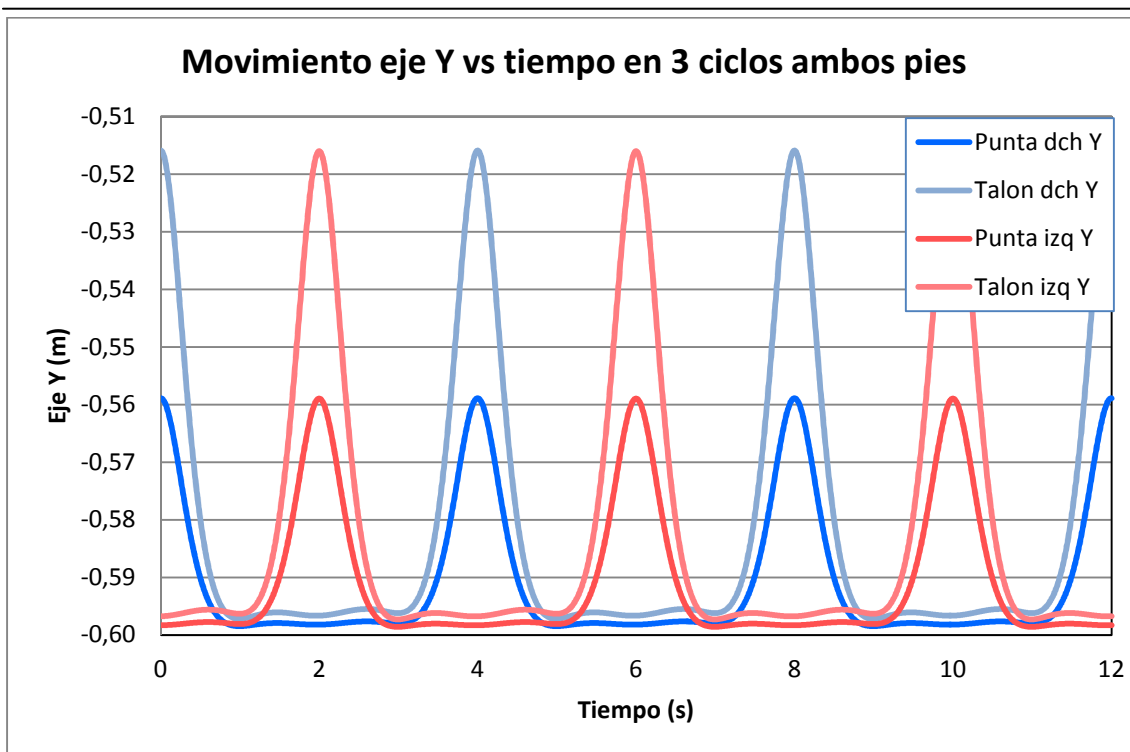


Grafico 6.1 Movimiento eje Y, ambos pies 3 ciclos

Este gráfico (Gráfico 6.1) muestra una repetitividad del movimiento vertical de ambos pies en sus puntos extremos punta y talón. Se observa que no existen singularidades que muestren una cadencia en el movimiento.

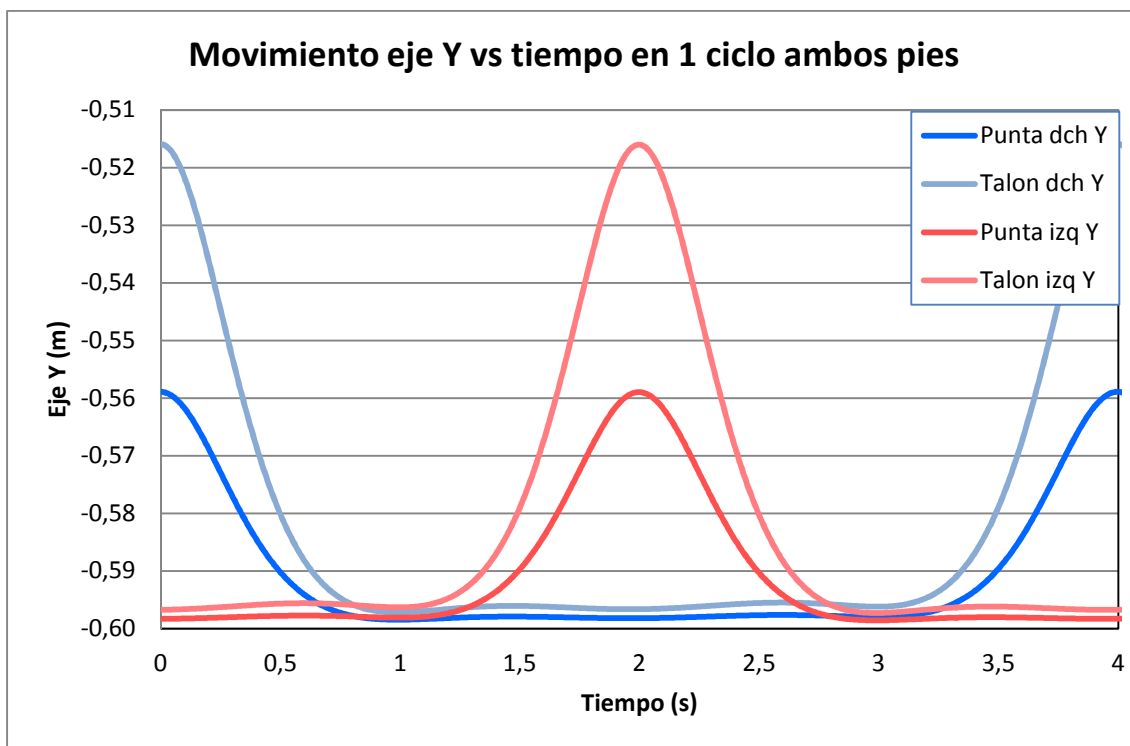


Grafico 6.2 Movimiento eje Y, ambos pies 1 ciclo

Este gráfico (Gráfico 6.2) es representativo de un solo ciclo a una velocidad 90° del movimiento vertical de ambos pies en el que se puede observar la repetitividad en los máximos y mínimos de ambos pies, por tanto no hay irregularidades en el movimiento vertical debido a diseño.

No se observan singularidades debido al paso del pie, como se puede observar en el paso del talón derecho y punta derecha (gráfico de color rojo y azul respectivamente), según baja el pie, éste presenta un leve balanceo debido a su exposición en el aire. A su vez se observa que el pie no está en perpendicular con la vertical en ningún instante, siendo su punto más álgido el de la pisada virtual y el mínimo cuando el pie al levantarse está en su punto más alto. Es reseñable que el pie por tanto siempre tiene un ángulo respecto a la horizontal y que el talón siempre está por encima de la punta de ambos pies.

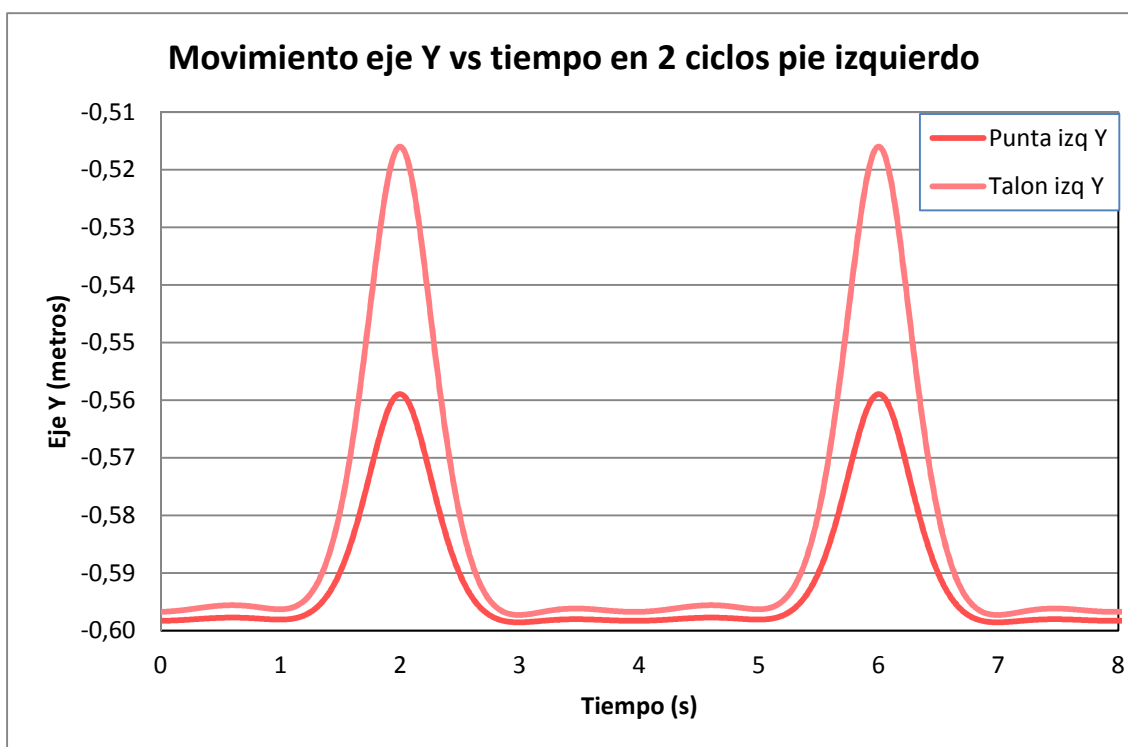


Gráfico 6.3 Movimiento eje Y, pie izquierdo 2 ciclos

El gráfico anterior (Gráfico 6.3) refleja lo anteriormente citado, y se observa con mayor claridad la particularidad del ángulo que mantiene el pie con la vertical así como, el movimiento de vaivén que se produce desde el segundo 3 al 5, que refleja una pisada en el aire del Pasibot.



Grafico 6.4 Movimiento eje X, ambos pies 3 ciclos

Este gráfico (Gráfico 6.4) muestra una repetitividad del movimiento vertical de ambos pies en sus puntos extremos punta y talón. Se observa que no existen singularidades que muestren una cadencia en el movimiento. Se trata de un movimiento de vaivén y que secuencia en ambos extremos un movimiento paralelo que es el caso de estudio.

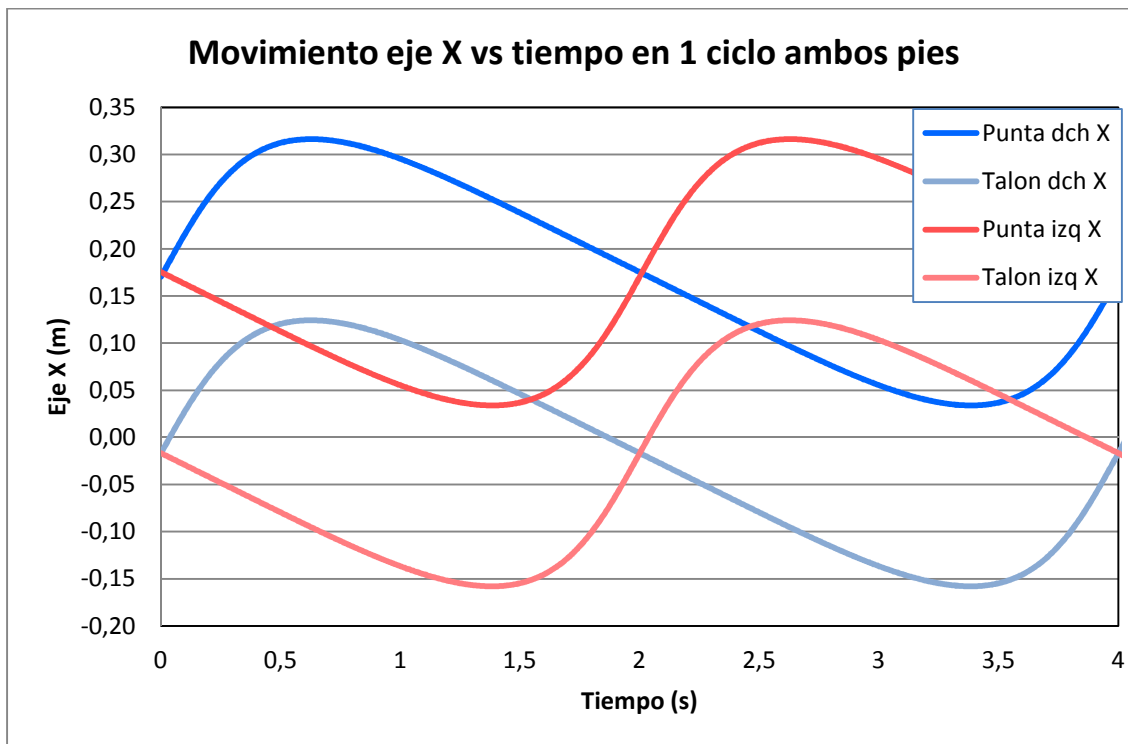


Grafico 6.5 Movimiento eje X, ambos pies 1 ciclo

En esta ocasión (Gráfico 6.5) se representa un solo ciclo o paso del movimiento de ambos pies respecto de la horizontal y en el cual podemos confirmar lo que citamos con anterioridad. Se percibe la alineación correcta de ambos pies ante su avance y como particularidad, cuando alcanza el punto más alto se produce una alineación del pie y por tanto un leve giro del mismo. Para ver este efecto con mayor claridad se expone un paso del pie izquierdo.



Gráfico 6.6 Movimiento eje X, pie izquierdo 1 ciclo

Se observa claramente (Gráfico 6.6) el efecto anteriormente citado en el segundo 2 donde el pie izquierdo ya se ha levantado y está en su punto más alto. Se produce esta alineación que se citaba con anterioridad y que se corrige en cuanto se sale de esta posición y que no vuelve a repetirse hasta que se produce la misma posición en el caminar del Pasibot. Para poder ver con mayor perspectiva las singularidades mencionadas se procede a evaluar el movimiento respecto de ambos planos.

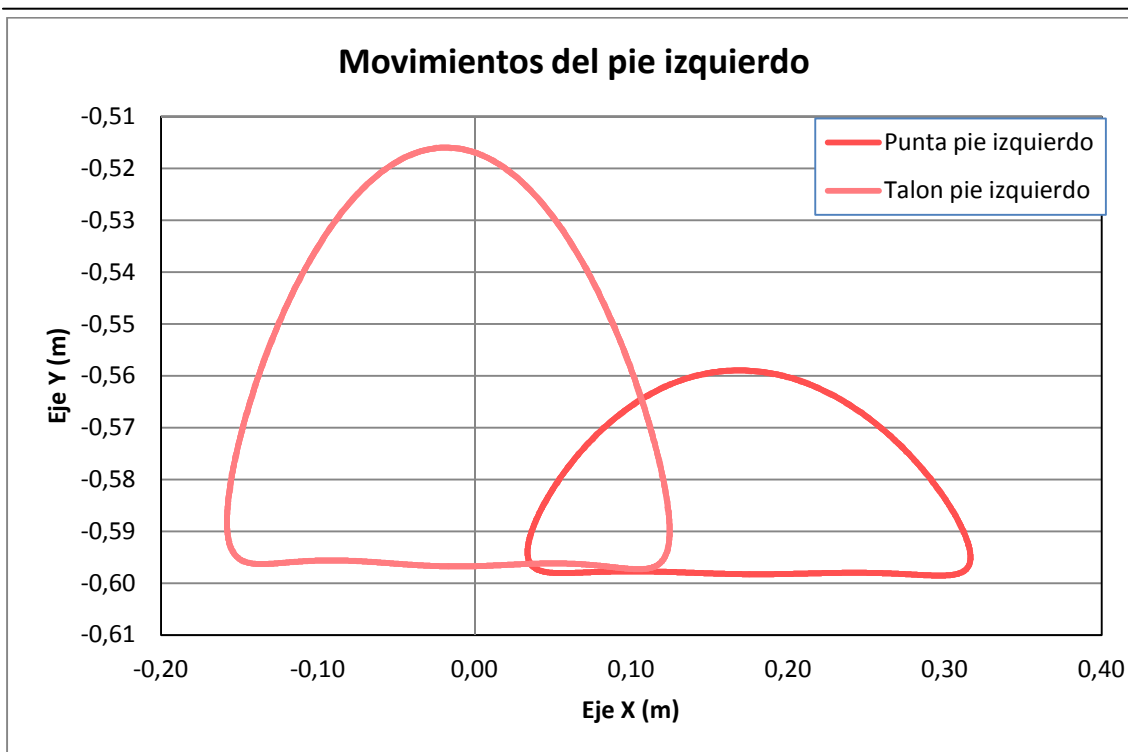


Grafico 6.7 Movimiento pie izquierdo en 1 ciclo

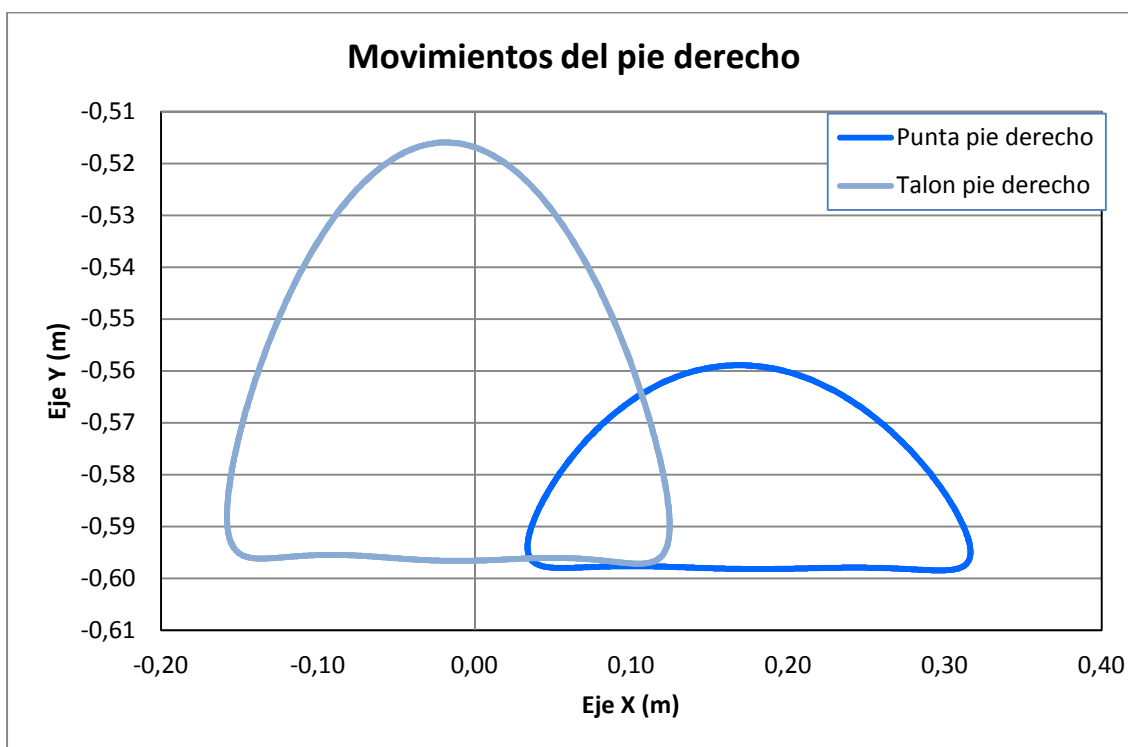


Grafico 6.8 Movimiento pie derecho en 1 ciclo

En los gráficos 6.7 y 6.8 se describe el movimiento efectuado por los pies en el modelo simplificado y colgado durante un ciclo. Lo que se observa a simple vista es que tanto el movimiento de los talones y de las puntas es el mismo, lo cual era de esperar ya que el movimiento que describen está sujeto a la particularidad de este modelo y es que el mismo está colgado y por tanto no tiene referencia con un suelo, sino que describe un ciclo de forma periódica y por tanto repetitiva en efectos.

Se observa claramente que el movimiento vertical descrito por los talones es el doble y tiene su misma longitud en su movimiento horizontal de lo cual se puede afirmar, que en el movimiento vertical siempre está a una altura mayor el talón que la punta. Éste movimiento da lugar a la existencia de un ángulo pronunciado que se va alineando con la horizontal según se acerca el Pasibot a realizar una pisada virtual con cualquiera de los dos pies y que el movimiento horizontal se traduce en la repetitividad de una longitud determinada por el paso del Pasibot, puesto que este no avanza al estar colgado.

Sin entrar mucho más en detalle en el movimiento descrito por estas posiciones equidistantes entre ambos pies, talón y punta, a continuación se exponen gráficos más detallados del movimiento de estos puntos característicos, en los cuales se observa la singularidad del vaivén que se produce al realizar la pisada virtual, ya que no se produce sobre ningún elemento, y que se cita anteriormente.

Al disponer en los siguientes gráficos (Gráficos 6.9 y 6.10) del movimiento descrito por los talones en primera instancia y después de las puntas de ambos pies en los dos gráficos, se observa que las graficas de ambos quedan superpuestas sobre la del elemento equidistante del otro pie, por tanto no existen irregularidades en el diseño del mismo y el movimiento descrito permite realizar el estudio bajo fricción de forma que al obtener particularidades, están sean objeto únicamente de las fricciones a las que se ve sometido el modelo.

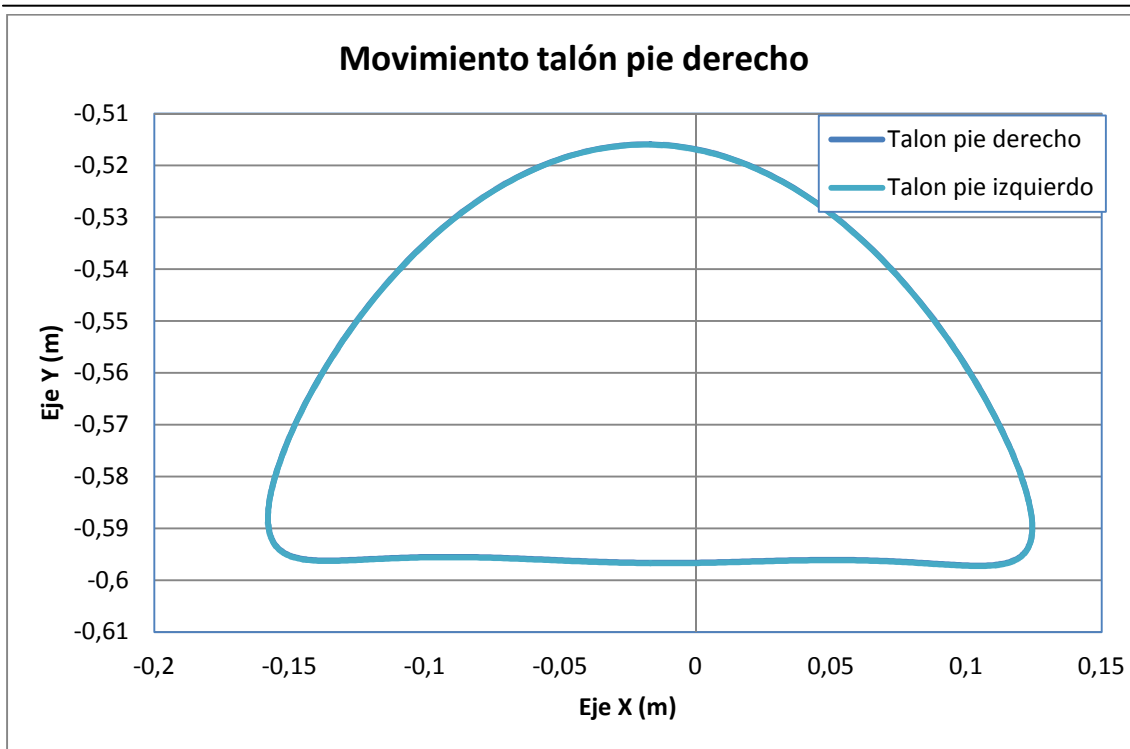


Grafico 6.9 Movimiento talón en 1 ciclo

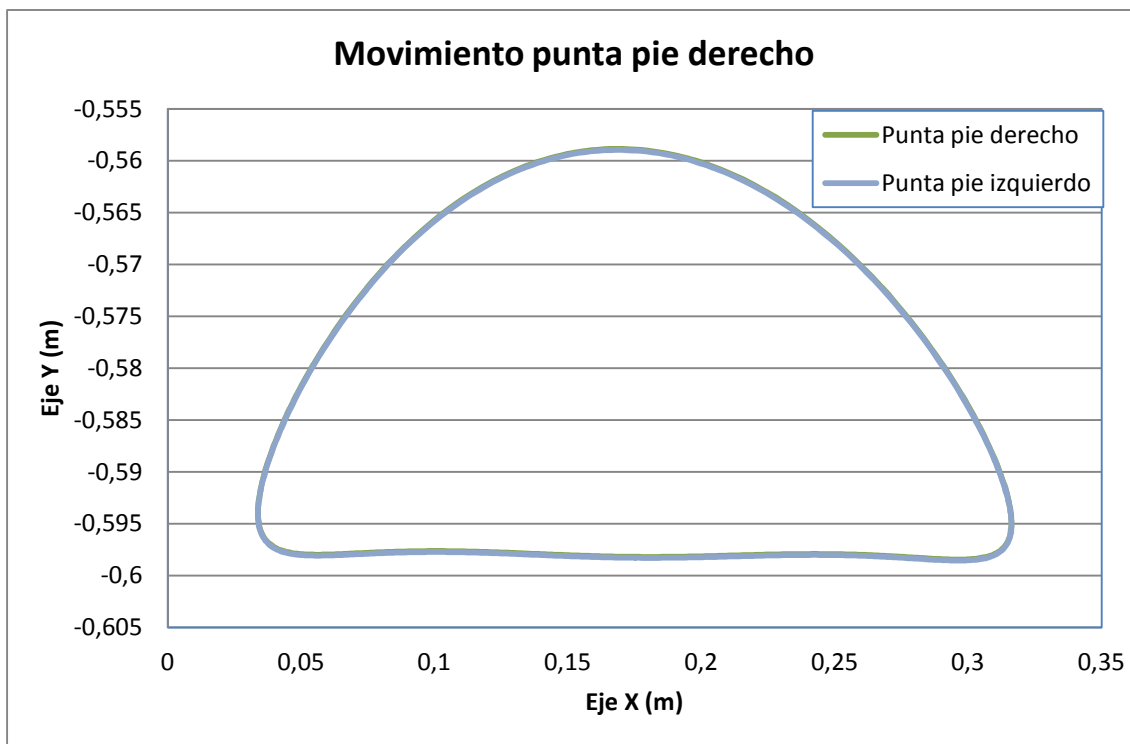


Grafico 6.10 Movimiento punta en 1 ciclo

6.1.1.2 ANÁLISIS DINÁMICO

Tras realizar el estudio cinemático del robot y no apreciar singularidades en el movimiento del mismo se procede a realizar el análisis de la influencia de las distintas fricciones que pueden aparecer.

6.1.1.2.1 ANÁLISIS SIN FRICCIÓN

Se realiza el estudio de los parámetros de contacto. Para el mismo, se estudia la dinámica a la que se ve sometido el Pasibot sin estar definidas las fricciones debidas a las juntas. Así pues el parámetro a estudiar a lo largo de las distintas simulaciones será el par necesario que debe producir el motor para mover el Pasibot.

El par obtenido para las distintas velocidades de giro es el siguiente:

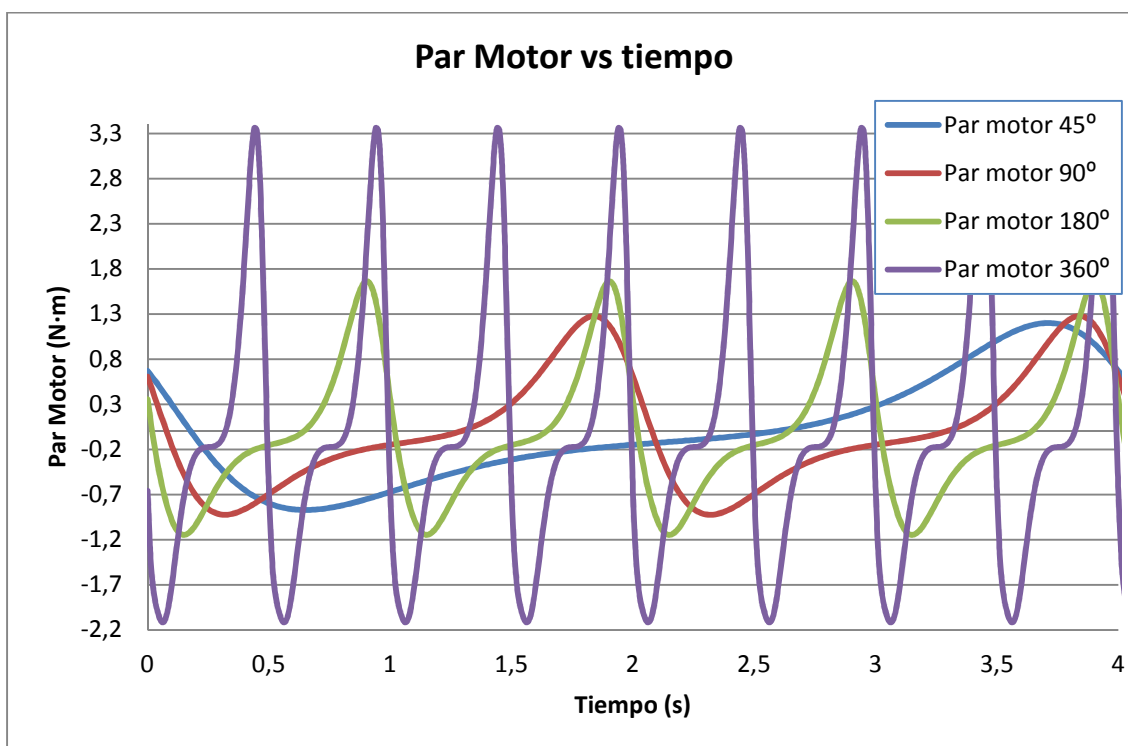


Gráfico 6.11 Par motor en el modelo Restringido sin fricción

Con esta primera muestra de resultados se aprecian las distintas diferencias ocasionadas al aplicarle a la manivela una velocidad de giro mayor.

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos en una gráfica para cada velocidad. Con ello se consigue una mayor claridad a la hora de ver los resultados. Éste será el proceso a seguir a la hora de mostrar los datos obtenidos en el presente documento.

Comparativa del par obtenido para cada una de las velocidades estudiadas.

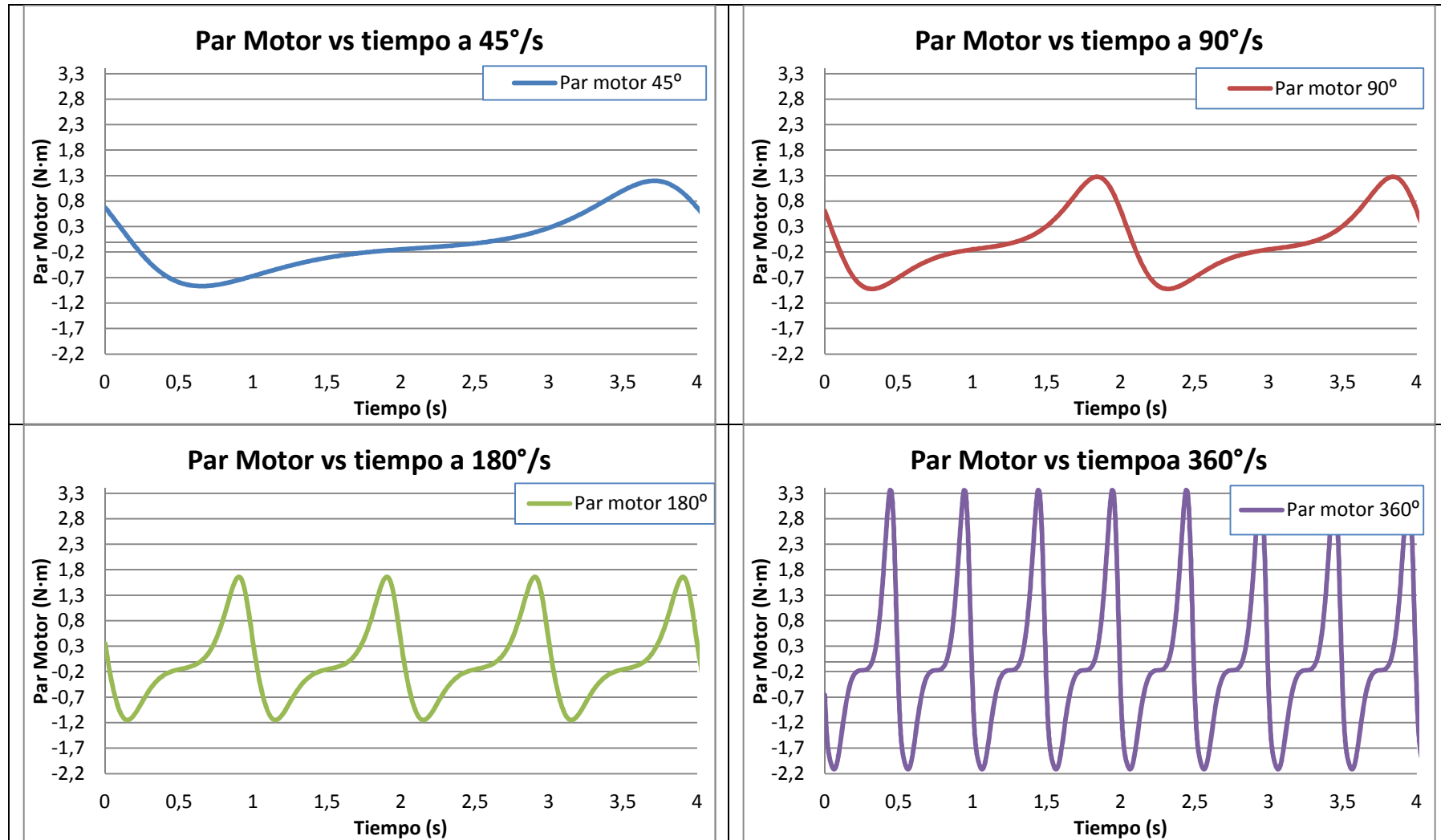


Grafico 6.12 Par motor sin fricción a distintas velocidades durante 4seg

Comparativa del par obtenido para cada una de las velocidades estudiadas para un ciclo de giro la manivela.

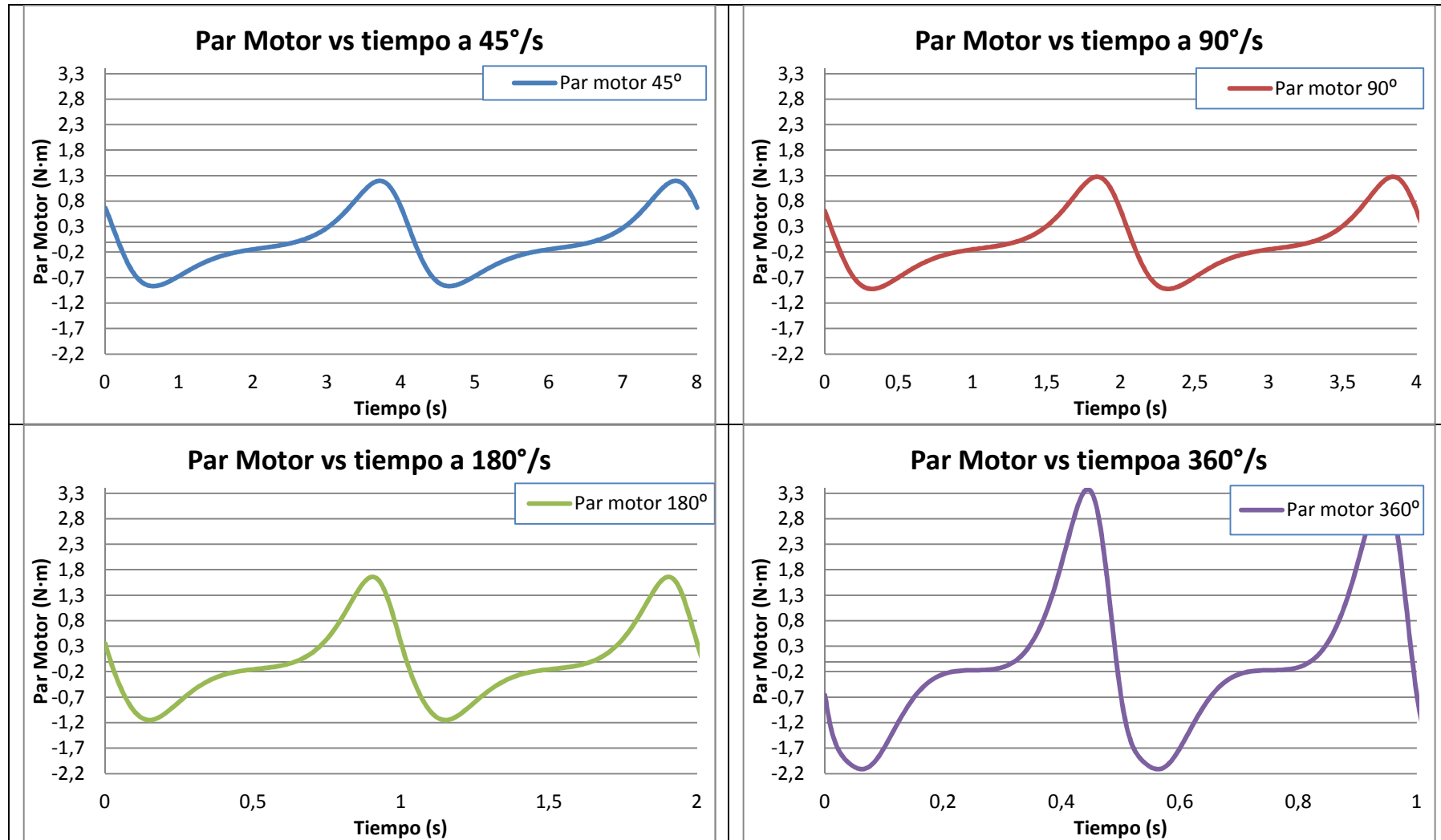


Grafico 6.13 Par motor sin fricción a distintas velocidades durante un ciclo

Debido a la periodicidad de las curvas representativas del par se ha decidido realizar el estudio para un tiempo de 4 segundos. Dependiendo de la velocidad, el robot realizará una serie de pasos:

- $V = 45^\circ/\text{s}$. El robot realiza un paso
- $V = 90^\circ/\text{s}$. El robot realiza dos pasos
- $V = 180^\circ/\text{s}$. El robot realiza cuatro pasos
- $V = 360^\circ/\text{s}$. El robot realiza ocho pasos.

Nótese que partiendo de la velocidad más baja, que en este caso es de $45^\circ/\text{s}$, el número de paso a realizar por el robot es el doble, debido a que se va doblando progresivamente la velocidad, como se aprecia en el gráfico anterior.

Se puede apreciar cómo para $45^\circ/\text{s}$ y $90^\circ/\text{s}$ el par máximo es prácticamente igual. Para $180^\circ/\text{s}$ aumenta un poco más, mientras que para $360^\circ/\text{s}$ el par máximo dobla prácticamente los anteriores.

6.1.1.2.2 ANÁLISIS CON FRICCIÓN EN LAS JUNTAS ROTACIONALES

Una vez evaluado el par en el Pasibot sin fricciones se procede a la implementación de las fricciones debidas a las juntas rotacionales, que se presentan en el Pasibot. Para ello se implementarán ambas piernas para ver los efectos que produce la fricción entre eslabones en su comportamiento dinámico y si tiene alguna repercusión en su movimiento.

Las juntas rotacionales se crean siguiendo el modelo del manual presente en este proyecto. Para ello se selecciona cada una de las juntas y se procede a modificar sus propiedades de fricción para lo cual se van a tener en cuenta los siguientes datos:

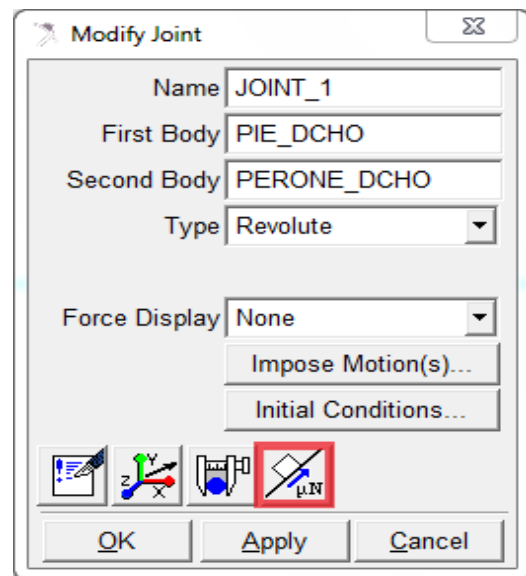


Figura 6.1 Tabla MSC.Adams Modificar Junta

- *Mu Static (Mu Estática)*: Define el coeficiente de fricción estático en la articulación. La magnitud de la fuerza de fricción es el producto de Mu Static y la magnitud de la fuerza normal de la articulación. La fuerza de fricción estática actúa para oponerse a la fuerza neta o el par a lo largo de los grados de libertad de la articulación.

Mu Static del ensayo = 0,005

- *Mu Dynamic (Mu Dinámica)*: Define el coeficiente de fricción dinámica. La magnitud de la fuerza de fricción es el producto de Mu Dynamic y la magnitud de la fuerza normal de la articulación. La fuerza de fricción dinámica actúa en la dirección opuesta a la velocidad de la articulación.

Mu Dynamic del ensayo = 0,003

- *Friction Arm (Fricción del brazo)*: Define el brazo de palanca efectivo utilizado para calcular la componente axial del par de fricción.

Friction arm del ensayo = $1 \cdot 10^{-3}$

- *Bending Reaction Arm (Brazo de reacción de flexión)*: Define el momento efectivo del brazo que se usa para calcular la contribución de los momentos de flexión en el par de fricción en la articulación de giro.

Bending Reaction Arm del ensayo = $1 \cdot 10^{-3}$

- *Pin Radius (Radio del perno)*: Define el radio del perno.

Pin Radius del ensayo = $2,5 \cdot 10^{-3}$

- *Stiction Transition Velocity (Velocidad de transición de la fricción estática)*: Define el umbral de velocidad absoluta para la transición desde la fricción dinámica hasta la fricción estática. Si la velocidad absoluta relativa del “marker” de la articulación es inferior al valor, entonces la fricción estática actúa para hacer la articulación conjunta.

Stiction Transition Velocity del ensayo = 0,1

- *Max Stiction Deformation (Máxima deformación de la fricción estática)*: Define el desplazamiento máximo que se puede dar en una articulación, una vez que la fuerza de fricción en la articulación entra en régimen de fricción estática. La ligera deformación permite a ADAMS solucionar fácilmente las condiciones de Coulomb para la fricción estática.

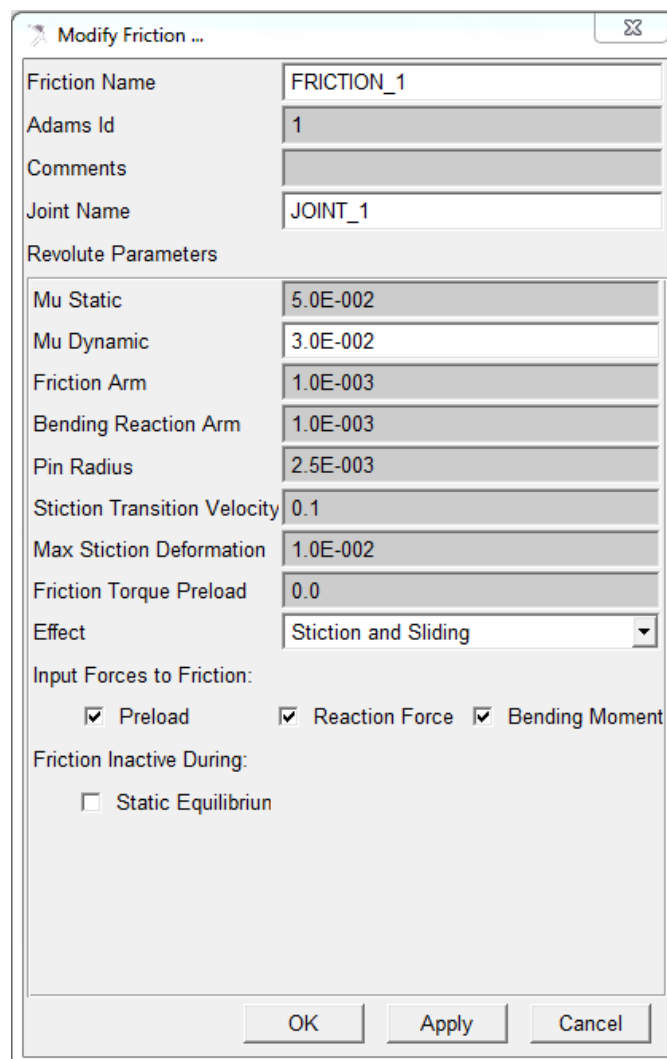
Max Stiction Deformation del ensayo = 0,01

- *Effect (Efecto)*: Define los efectos de fricción en el modelo de fricción, ya sea fricción estática y de deslizamiento, fricción estática o de deslizamiento. Fricción estática es un efecto de fricción estática, mientras que el deslizamiento es un efecto de fricción dinámica. Excluyendo fricción estática en simulaciones que no lo requieran, se puede mejorar en gran medida la velocidad de simulación. El valor predeterminado es fricción estática y de deslizamiento.

Effect del ensayo = Stiction and Sliding

- *Input Forces to Friction (Fuerzas de entrada para la fricción)*: Define las fuerzas de entrada para el modelo de fricción. Por defecto, todas las precargas definidas por el usuario y la fuerza de reacción en la articulación y momentos están incluidas. Se puede personalizar el modelo de fricción de la fuerza mediante la limitación de las fuerzas de entrada que se especifique.

Fuerzas de inicio para la fricción del ensayo $\left\{ \begin{array}{l} \text{Precarga} \\ \text{Fuerza de reacción} \\ \text{Momento de flexión} \end{array} \right\}$



Modify Friction ...	
Friction Name	FRICION_1
Adams Id	1
Comments	
Joint Name	JOINT_1
Revolute Parameters	
Mu Static	5.0E-002
Mu Dynamic	3.0E-002
Friction Arm	1.0E-003
Bending Reaction Arm	1.0E-003
Pin Radius	2.5E-003
Stiction Transition Velocity	0.1
Max Stiction Deformation	1.0E-002
Friction Torque Preload	0.0
Effect	Stiction and Sliding
Input Forces to Friction:	
<input checked="" type="checkbox"/> Preload	<input checked="" type="checkbox"/> Reaction Force
<input checked="" type="checkbox"/> Bending Moment	
Friction Inactive During:	
<input type="checkbox"/> Static Equilibrium	
<div>OK Apply Cancel</div>	

Figura 6.2 Propiedades de fricción de una junta rotacional a ensayo

Una vez definidas las propiedades de las juntas rotacionales, se implementa en MSC Adams las fricciones provocadas por cada una de las juntas con un total de 36 (Friction_1 a Friction_36), y se realiza el estudio para comprobar si la fricción debida a las

juntas rotacionales provoca singularidades o cambios significativos en el par necesario, o bien en el comportamiento cinemático del robot. Las velocidades utilizadas serán las mismas que para el estudio realizado anteriormente: 45°/s, 90°/s, 180°/s y 360°/s.

En la siguiente figura (Figura 6.3) se aprecia la complejidad del modelo, la cantidad de parámetros a controlar en el robot una vez implementadas la totalidad de las juntas traslacionales.

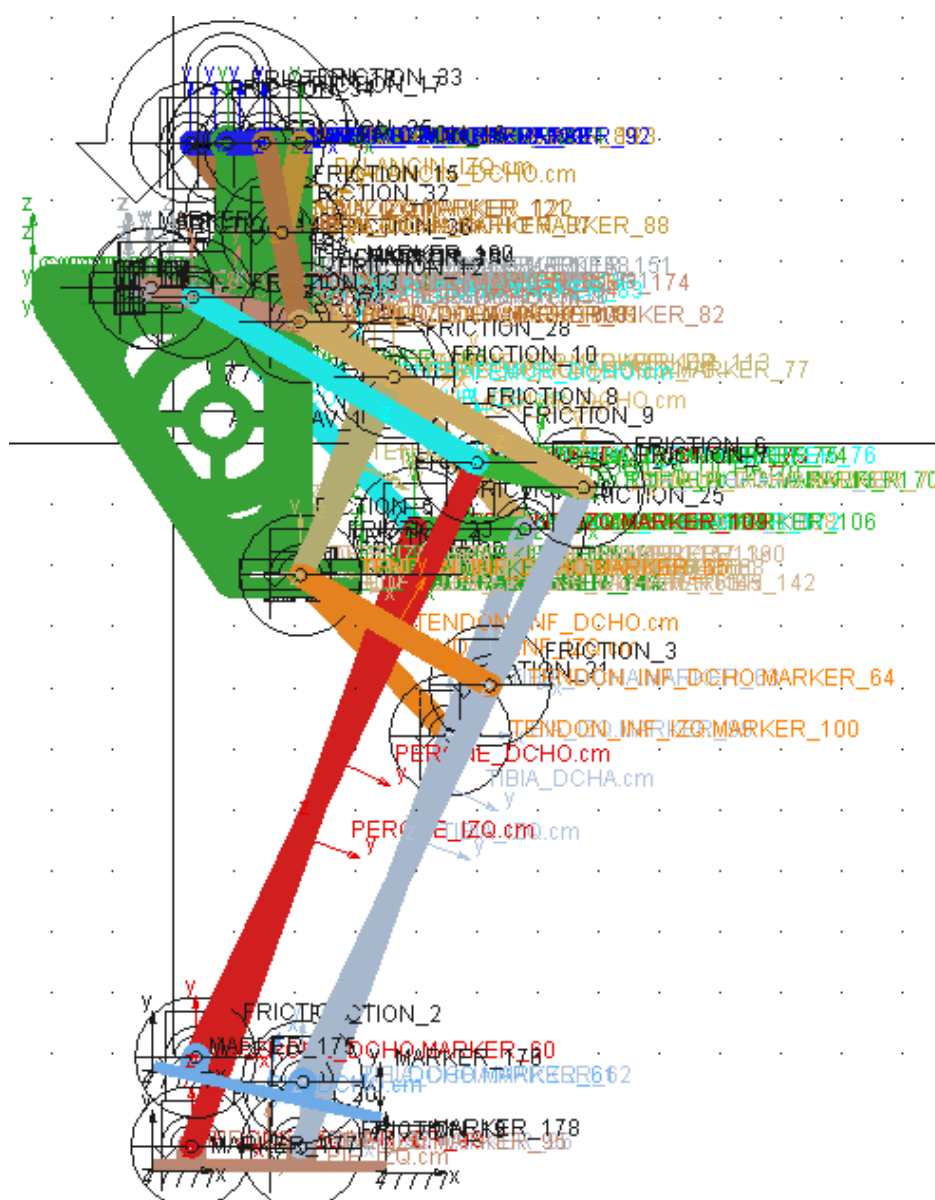


Figura 6.3 Juntas Rotacionales implementadas en MSC Adams.

Las juntas del pasibot son un total de 42, divididas en 36 rotacionales, 4 traslacionales y 2 fijas. Las juntas rotacionales están divididas entre las dos piernas con un total de dieciocho en cada una, las rotacionales a su vez están divididas entre las dos piernas

con un total de dos en cada pierna, situadas en las deslizaderas superior y inferior. Las juntas fijas están situadas entre las manivelas y la cadera con Ground, para mantener el Pasibot estable sin un cuerpo sólido sobre el que apoyarse.

Las juntas rotacionales están distribuidas desde el pie hasta la cadera, de cada pierna, en cada unión entre eslabones para virtualizar los movimientos rotacionales generados entre los mismos.

En las siguientes tablas (Tablas 6.1, 6.2 y 6.3), se presenta un resumen de todas las juntas presentes en el Pasibot, disgregadas entre pierna derecha y pierna izquierda, así como otras juntas (fijas). Dentro de cada tabla se mencionan los eslabones entre los que está dispuesta la junta, así como su número y el tipo de la misma, e indicando finalmente el tipo de junta del que se trata (revolución, traslación o fija).

JUNTAS PIERNA DERECHA			
JUNTA	CUERPO 1	CUERPO 2	TIPO
JUNTA 1	PIE_DCHO	PERONE_DCHO	REVOLUCIÓN
JUNTA 2	PIE_DCHO	TIBIA_DCHA	REVOLUCIÓN
JUNTA 3	TIBIA_DCHA	TENDON_INF_DCHO	REVOLUCIÓN
JUNTA 4	TENDON_INF_DCHO	TENDON_SUP_DCHO	REVOLUCIÓN
JUNTA 5	TENDON_SUP_DCHO	DESLIZADE_INF_DCHO	REVOLUCIÓN
JUNTA 6	TIBIA_DCHA	RODILLA_DCHA	REVOLUCIÓN
JUNTA 7	RODILLA_DCHO	FEMUR_DCHO	REVOLUCIÓN
JUNTA 8	PERONE_DCHO	RODILLA_DCHA	REVOLUCIÓN
JUNTA 9	RODILLA_DCHA	CONTRAFEMUR_DCHO	REVOLUCIÓN
JUNTA 10	TENDON_SUP_DCHO	FEMUR_DCHO	REVOLUCIÓN
JUNTA 11	FEMUR_DCHO	BIELA_DCHA	REVOLUCIÓN
JUNTA 12	BIELA_DCHA	ESTABILIZADOR_DCHO	REVOLUCIÓN
JUNTA 13	CONTRAFEMUR_DCHO	ESTABILIZADOR_DCHO	REVOLUCIÓN
JUNTA 14	ESTABILIZADOR_DCHO	DESLIZADERA_SUP_DCHA	REVOLUCIÓN
JUNTA 15	BIELA_DCHA	BALANCIN_DCHO	REVOLUCIÓN
JUNTA 16	BALANCIN_DCHO	CADERA	REVOLUCIÓN
JUNTA 17	BIELA_DCHA	MANIVELA_DCHA	REVOLUCIÓN



JUNTA 18	MANIVELA_DCHA	CADERA	REVOLUCIÓN
JUNTA 38	CADERA	DESLIZADERA_INF_DCHA	TRASLACIONAL
JUNTA 41	DESLIZADERA_SUP_DCHA	CADERA	TRASLACIONAL

Tabla 6.1 Juntas Pierna Derecha

JUNTAS PIERNA IZQUIERDA			
JUNTA	CUERPO 1	CUERPO 2	TIPO
JUNTA 19	PIE_IZQ	TIBIA_IZQ	REVOLUCIÓN
JUNTA 20	PIE_IZQ	PERONE_IZQ	REVOLUCIÓN
JUNTA 21	TIBIA_IZQ	TENDON_INF_IZQ	REVOLUCIÓN
JUNTA 22	TENDON_INF_IZQ	TENDON_SUP_IZQ	REVOLUCIÓN
JUNTA 23	TENDON_SUP_IZQ	DESLIZADERA_INF_IZQ	REVOLUCIÓN
JUNTA 24	TIBIA_IZQ	RODILLA_IZQ	REVOLUCIÓN
JUNTA 25	RODILLA_IZQ	FEMUR_IZQ	REVOLUCIÓN
JUNTA 26	PERONE_IZQ	RODILLA_IZQ	REVOLUCIÓN
JUNTA 27	RODILLA_IZQ	CONTRAFEMUR_IZQ	REVOLUCIÓN
JUNTA 28	TENDON_SUP_IZQ	FEMUR_IZQ	REVOLUCIÓN
JUNTA 29	FEMUR_IZQ	BIELA_IZQ	REVOLUCIÓN
JUNTA 30	ESTABILIZADOR_IZQ	CONTRAFEMUR_IZQ	REVOLUCIÓN
JUNTA 31	ESTABILIZADOR_IZQ	DESLIZADERA_SUP_IZQ	REVOLUCIÓN
JUNTA 32	BIELA_IZQ	BALANCIN_IZQ	REVOLUCIÓN
JUNTA 33	BALANCIN_IZQ	CADERA	REVOLUCIÓN
JUNTA 34	BIELA_IZQ	MANIVELA_IZQ	REVOLUCIÓN
JUNTA 35	MANIVELA_IZQ	CADERA	REVOLUCIÓN
JUNTA 40	BIELA_IZQ	ESTABILIZADOR_IZQ	REVOLUCIÓN
JUNTA 37	CADERA	DESLIZADERA_INF_IZQ	TRASLACIONAL
JUNTA 42	DESLIZADERA_SUP_IZQ	CADERA	TRASLACIONAL

Tabla 6.2 Juntas Piernas Izquierda



OTRAS JUNTAS PASIBOT			
JUNTA	CUERPO 1	CUERPO 2	TIPO
JUNTA 36	CADERA	GROUND	FIJA
JUNTA 39	MANIVELA_DCHA	MANIVELA_IZQ	FIJA

Tabla 6.3 Otras juntas

El ensayo en MSC Adams del Pasibot con fricciones en las 36 juntas rotacionales, se realiza a varias velocidades para poder contemplar con mayor claridad el efecto que provoca la fricción una vez introducida en las juntas del Pasibot.

En primer lugar hay que definir los coeficientes de fricción empleados “Mu Static” y “Mu Dinamic”.

Se realizarán varias simulaciones variando los parámetros anteriormente nombrados para ver su influencia sobre el par del motor. Los parámetros utilizados serán los siguientes.

- $\mu_s=5e-3$ y $\mu_d=3e-3$
- $\mu_s=7e-3$ y $\mu_d=5e-3$
- $\mu_s=3e-2$ y $\mu_d=1e-2$

Para la realización de las distintas simulaciones, se ha doblado el tiempo de estudio, pasando éste a ser de 8 segundos en lugar de 4 segundos. El motivo por el cual se ha producido este cambio es porque al introducirles fricciones a las juntas se producen unos picos en las dos primeras vueltas de la manivela. Pasadas esas dos vueltas el par obtenido describe un comportamiento periódico.

En primer lugar, el par obtenido para las distintas velocidades de giro es el siguiente:

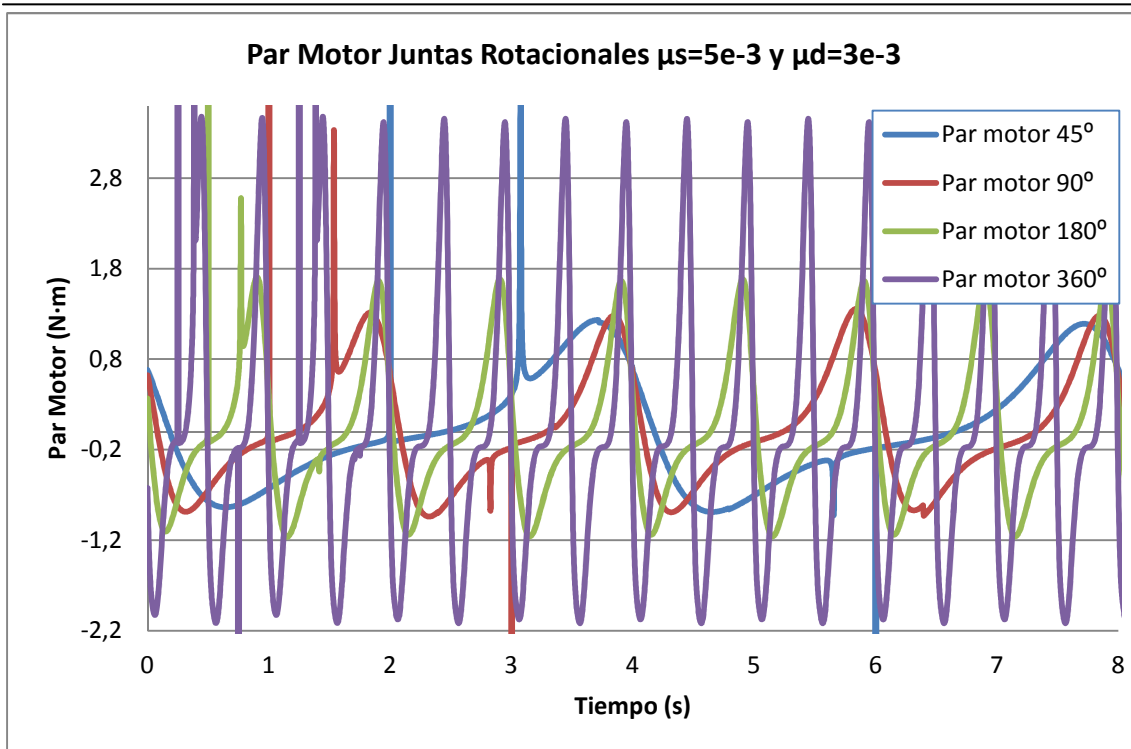


Gráfico 6.14 Par motor modelo restringido juntas de revolución ($\mu_s=5e-3$ y $\mu_d=3e-3$)

Comparativa del par obtenido para cada una de las velocidades estudiadas para unos valores de $\mu_s=5e-3$ y $\mu_d=3e-3$

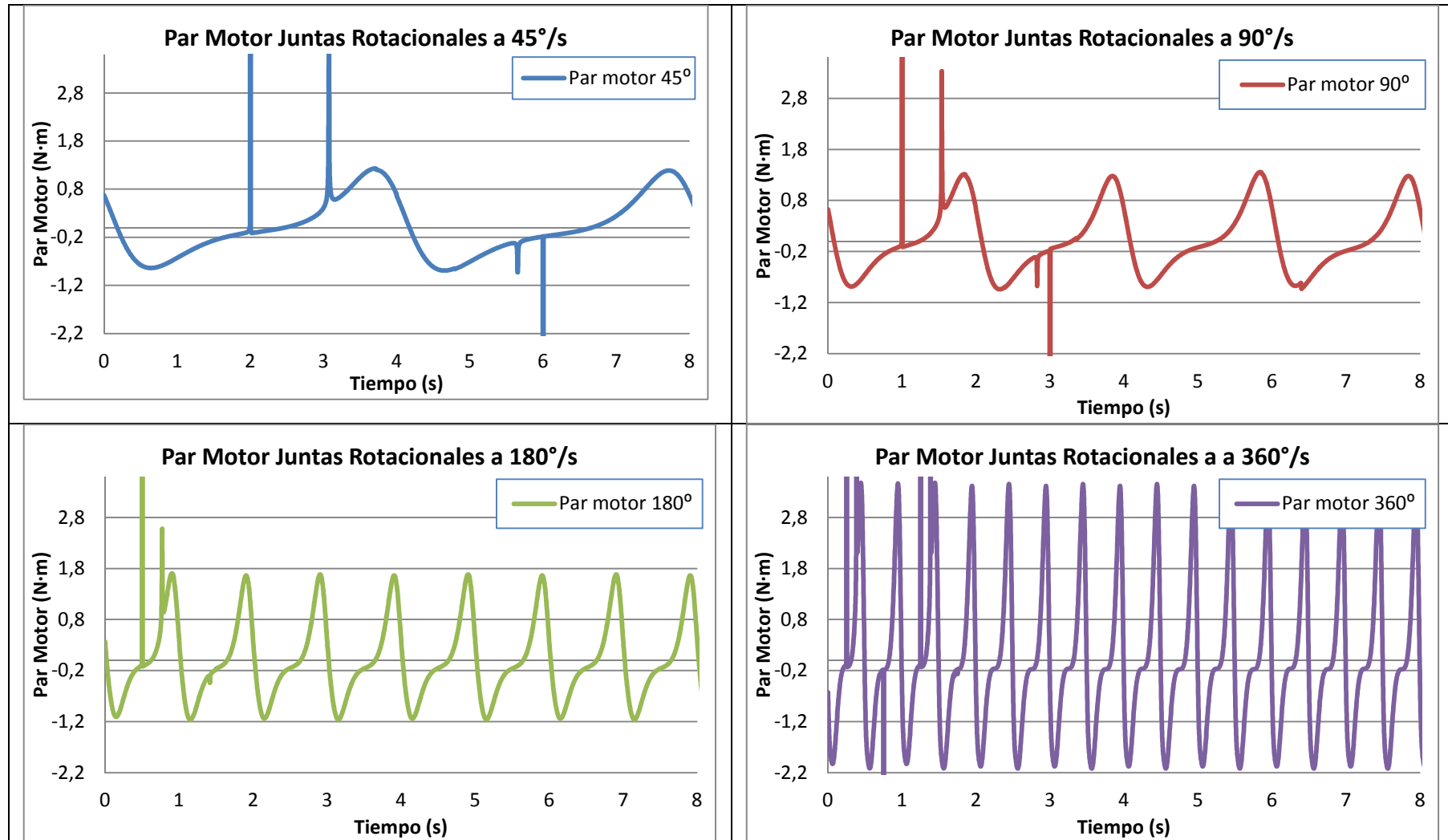


Gráfico 6.15 Par motor juntas rev. ($\mu_s=5e-3$ y $\mu_d=3e-3$) distintas vel. durante 8seg

Comparativa del par obtenido para cada una de las velocidades estudiadas para unos valores de $\mu_s=5e-3$ y $\mu_d=3e-3$ en un ciclo de giro de la manivela.

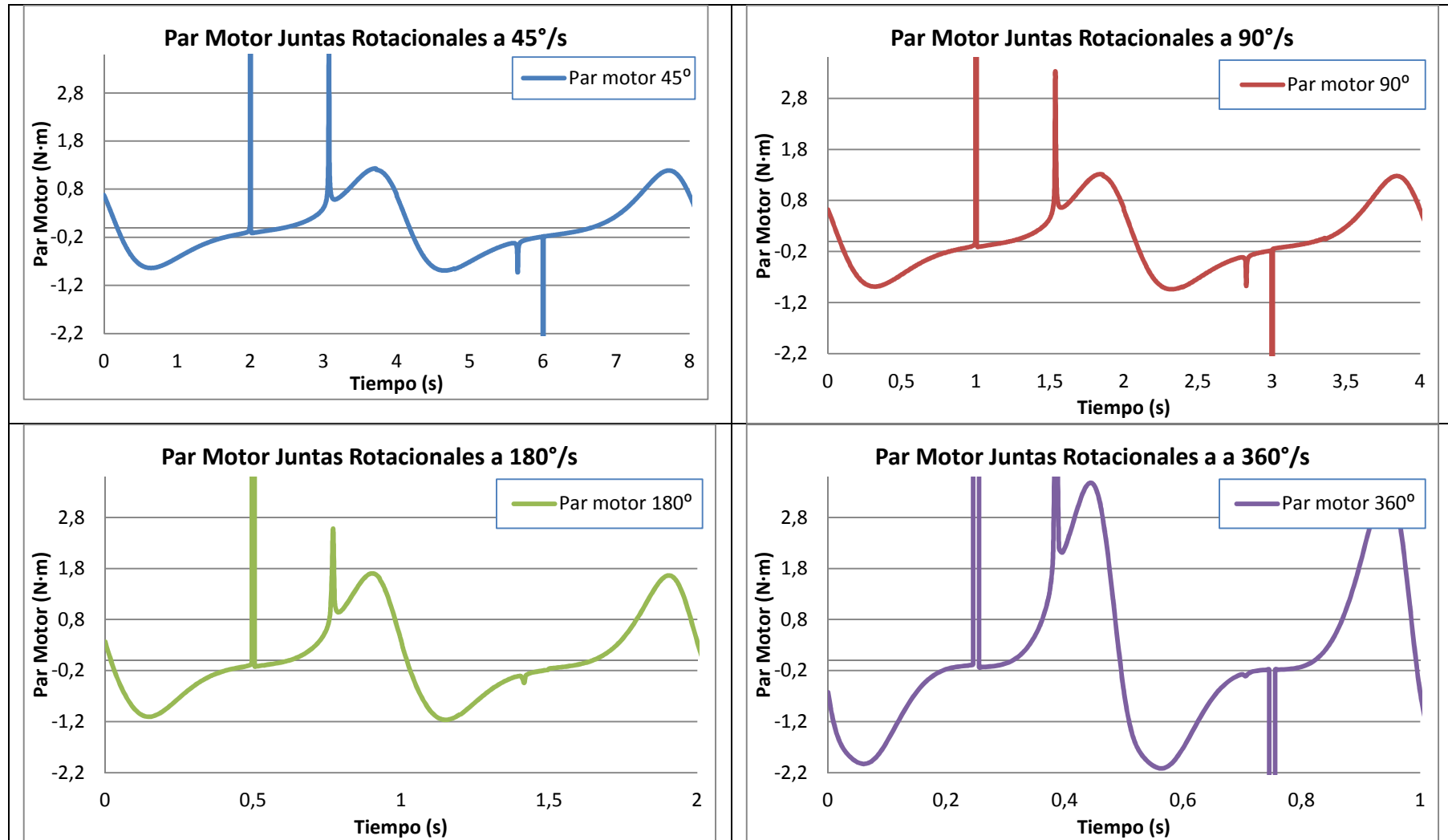


Gráfico 6.16 Par motor juntas rev. ($\mu_s=5e-3$ y $\mu_d=3e-3$) distintas vel. durante un ciclo

En segundo lugar, el par obtenido para las distintas velocidades de giro es el siguiente:

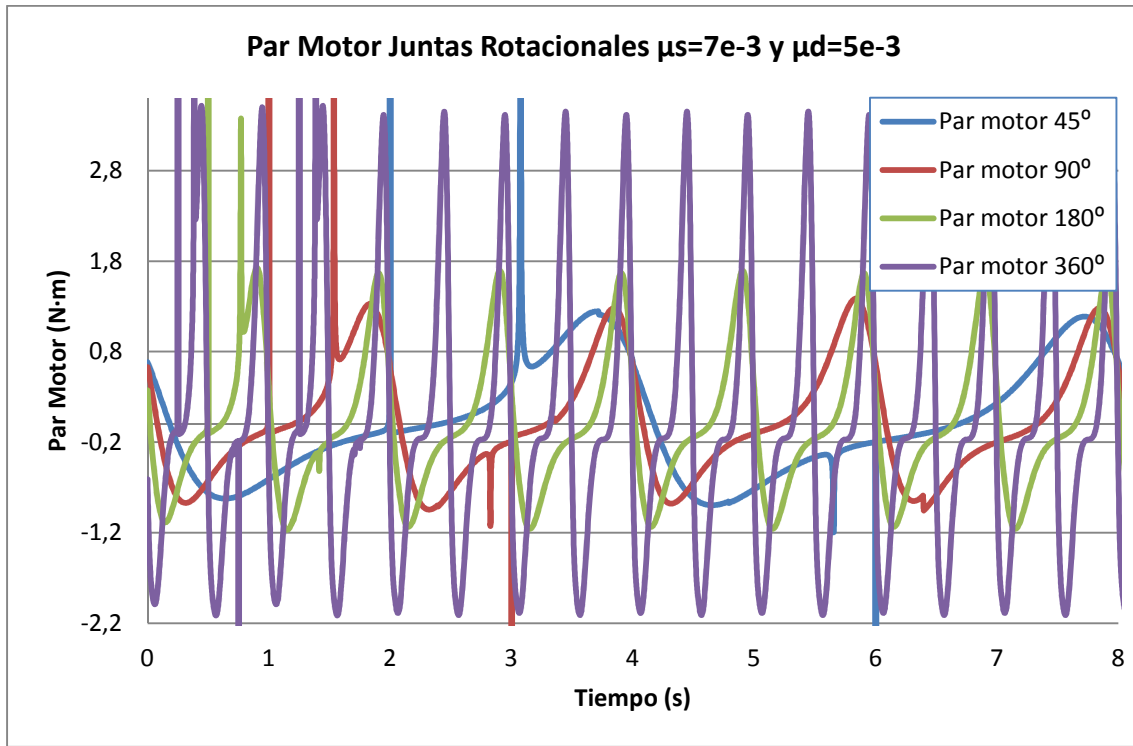


Gráfico 6.17 Par motor modelo restringido juntas de revolución ($\mu_s=7e-3$ y $\mu_d=5e-3$)

Comparativa del par obtenido para cada una de las velocidades estudiadas para unos valores de $\mu_s=7e-3$ y $\mu_d=5e-3$

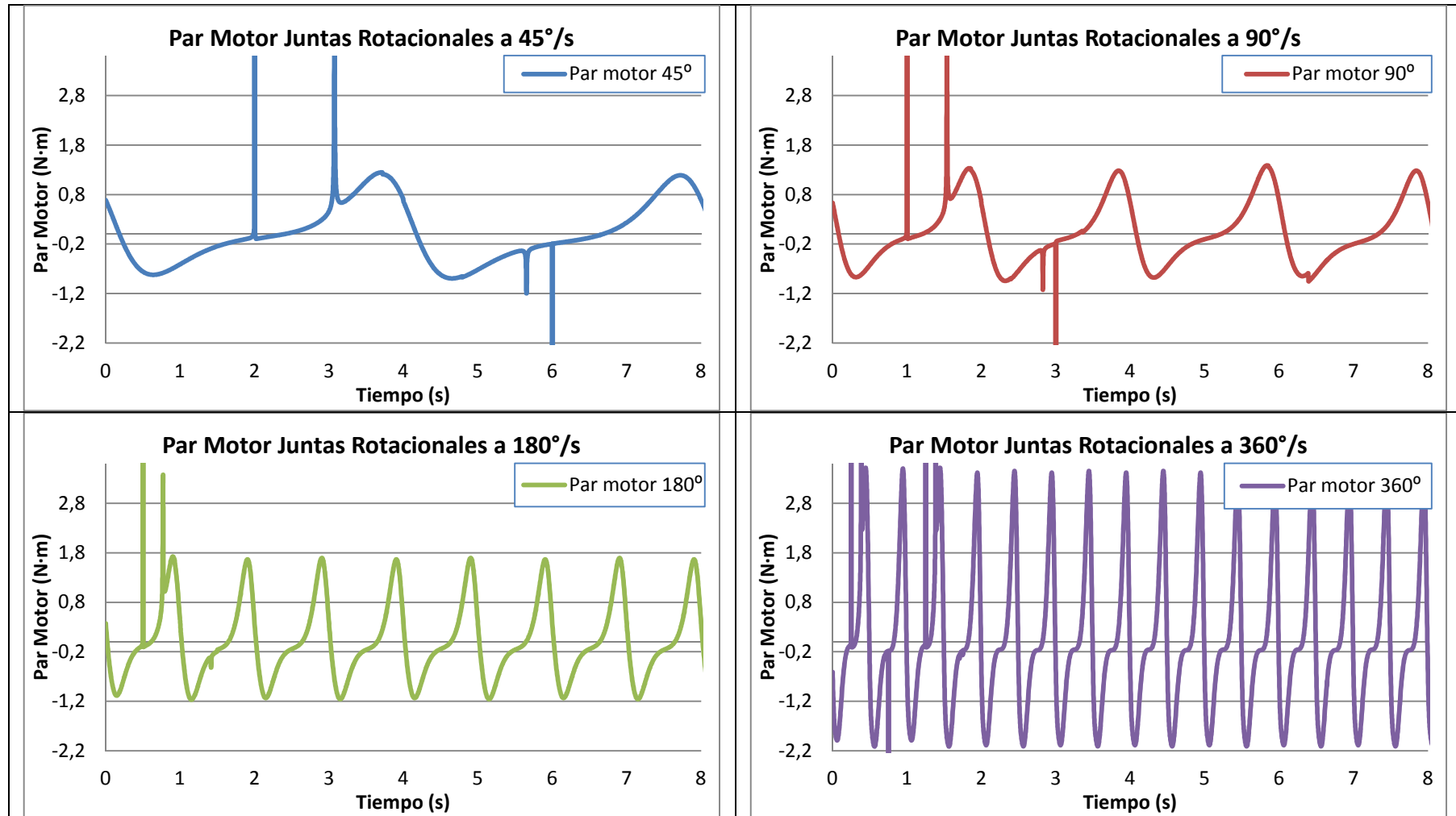


Gráfico 6.18 Par motor juntas rev. ($\mu_s=7e-3$ y $\mu_d=5e-3$) distintas vel. durante 8seg

Comparativa del par obtenido para cada una de las velocidades estudiadas para unos valores de $\mu_s=7e-3$ y $\mu_d=5e-3$ en un ciclo de giro de la manivela

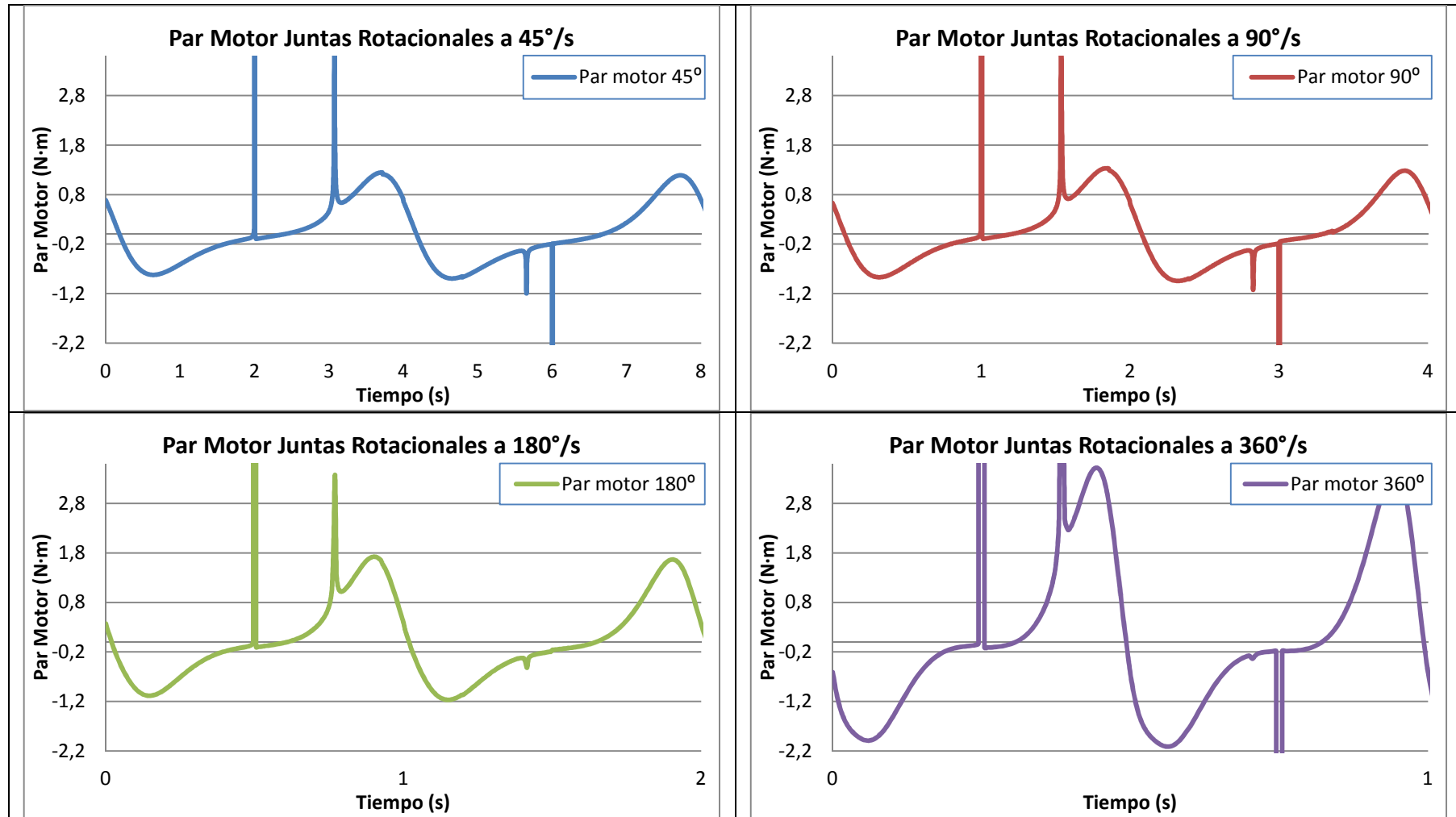


Gráfico 6.19 Par motor juntas rev. ($\mu_s=7e-3$ y $\mu_d=5e-3$) distintas vel. durante un ciclo

En tercer lugar, el par obtenido para las distintas velocidades de giro es el siguiente:

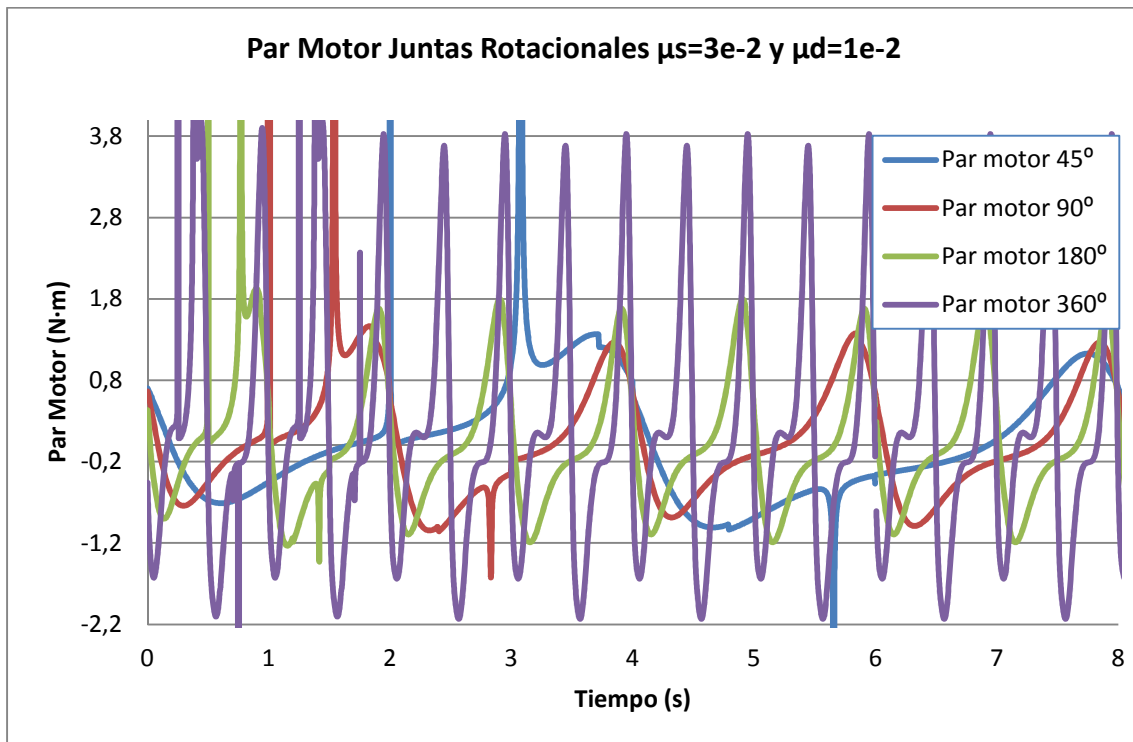


Gráfico 6.20 Par motor modelo restringido juntas de revolución ($\mu_s=3e-2$ y $\mu_d=1e-2$)

Comparativa del par obtenido para cada una de las velocidades estudiadas para unos valores de $\mu_s=3e-2$ y $\mu_d=1e-2$

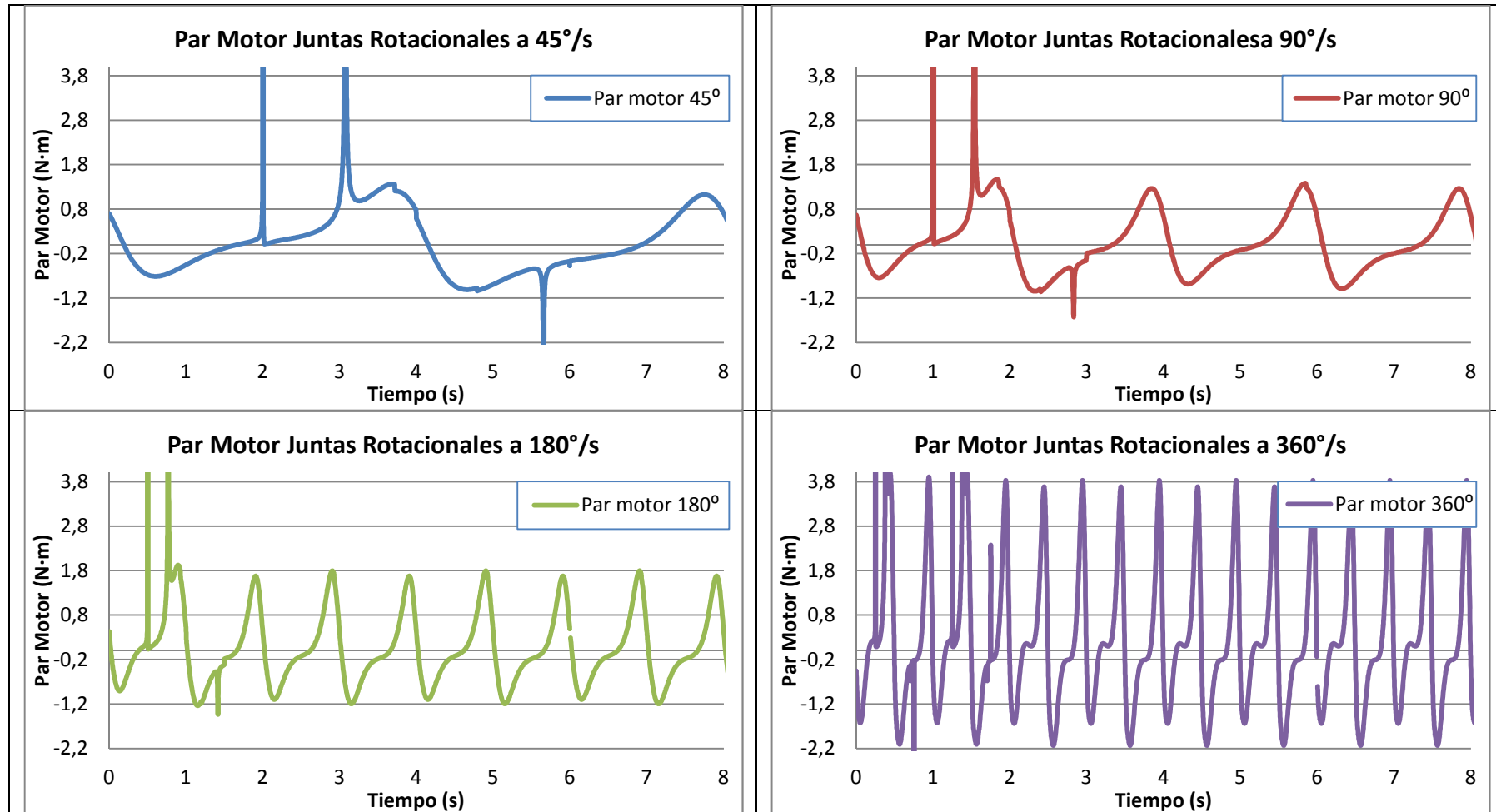


Gráfico 6.21 Par motor juntas rev. ($\mu_s=3e-2$ y $\mu_d=1e-2$) distintas vel. durante 8seg

Comparativa del par obtenido para cada una de las velocidades estudiadas para unos valores de $\mu_s=3e-2$ y $\mu_d=1e-2$ en un ciclo de giro de la manivela

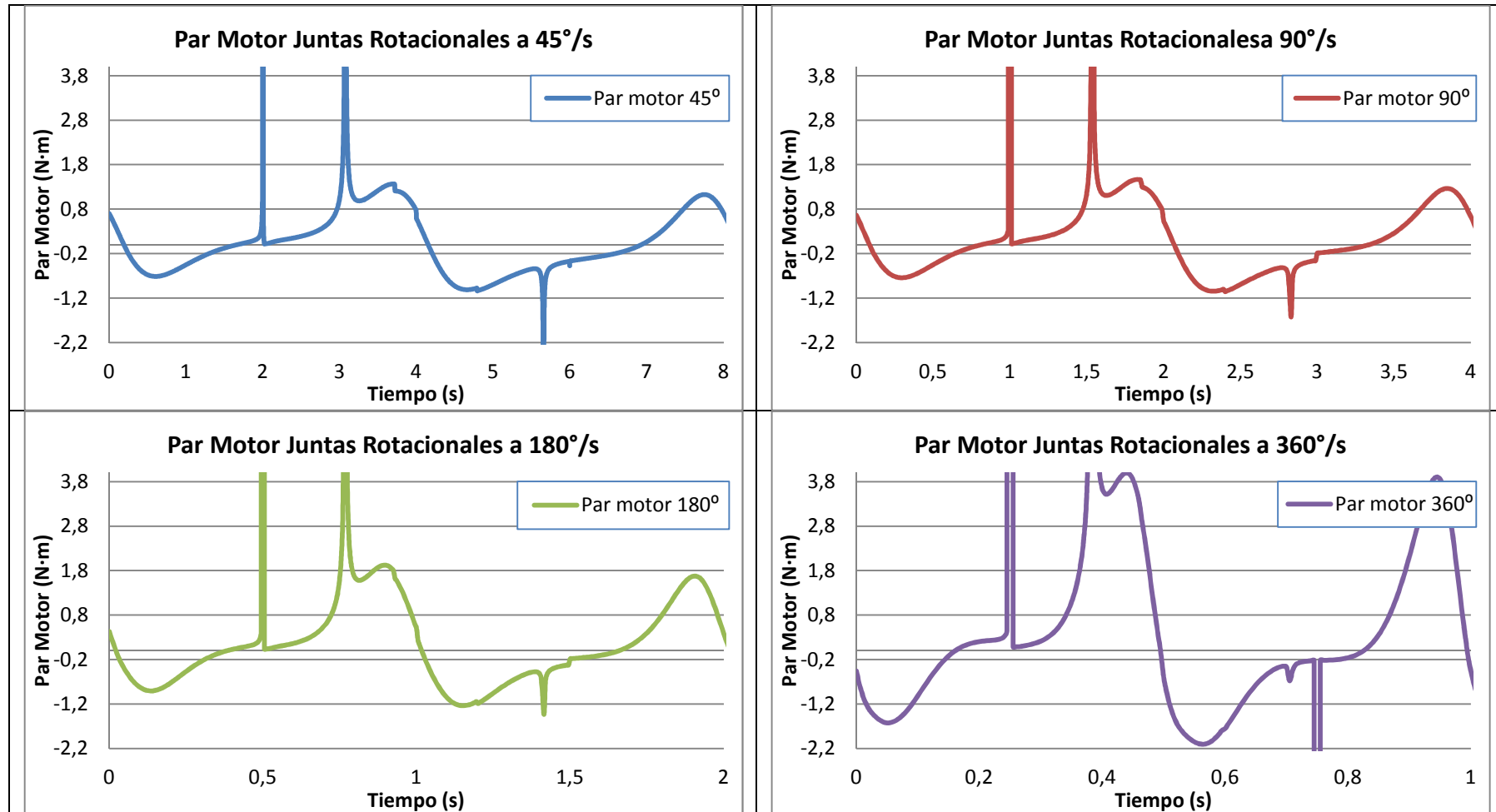


Gráfico 6.22 Par motor juntas rev. ($\mu_s=3e-2$ y $\mu_d=1e-2$) distintas vel. durante un ciclo

Los resultados obtenidos para las dos primeras simulaciones son prácticamente idénticos. Apenas se encuentra alguna diferencia entre escoger en primer lugar $\mu_s=5e-3$ y $\mu_d=3e-3$, y en segundo lugar $\mu_s=7e-3$ y $\mu_d=5e-3$. Para el segundo caso el par obtenido es algo mayor, pero tampoco significativamente.

Donde sí se aprecian diferencias es en los resultados obtenidos para la tercera simulación, pero curiosamente sólo para una velocidad de $360^\circ/\text{s}$. Para el resto de velocidades el par obtenido es muy similar al ya obtenido anteriormente. Para dicha velocidad, se produce un aumento considerable del par en el motor, además de que se los máximos valores del par ya no son constantes, y de acuerdo al movimiento de paso del Pasibot indica cómo cuando realiza el paso con una pierna da un máximo algo mayor que cuando lo realiza con la contraria. Sin embargo, en los mínimos del par (aunque estos deberían encontrarse en valor absoluto) sí que se aprecia mejor dicha diferencia. Cabe de destacar de nuevo que esta singularidad sólo se ha producido a una velocidad de $360^\circ/\text{s}$.

Así pues, se puede concluir que los resultados obtenidos para las distintas juntas de rotación son muy parejos, para los distintos valores de fricción introducidos. Sólo se encuentran diferencias a destacar en la simulación cuyas fricciones han sido más elevadas, y a la velocidad mayor, es decir, en el caso más desfavorable.

Como se pudo concluir con anterioridad cuando se realizó la implementación de fricción en las simulaciones sencillas, la implementación de fricción en las juntas de rotación no influye significativamente en el par del motor. Ésta influencia la encontramos únicamente en la tercera simulación, con unos parámetros de $\mu_s=3e-$ y $\mu_d=1e-2$. Estos valores son 10 veces mayores a los utilizados en las dos primeras simulaciones.

Finalmente, se procederá a la comparación de los distintos valores asignados a las juntas de rotación para cada una de las velocidades de estudio.

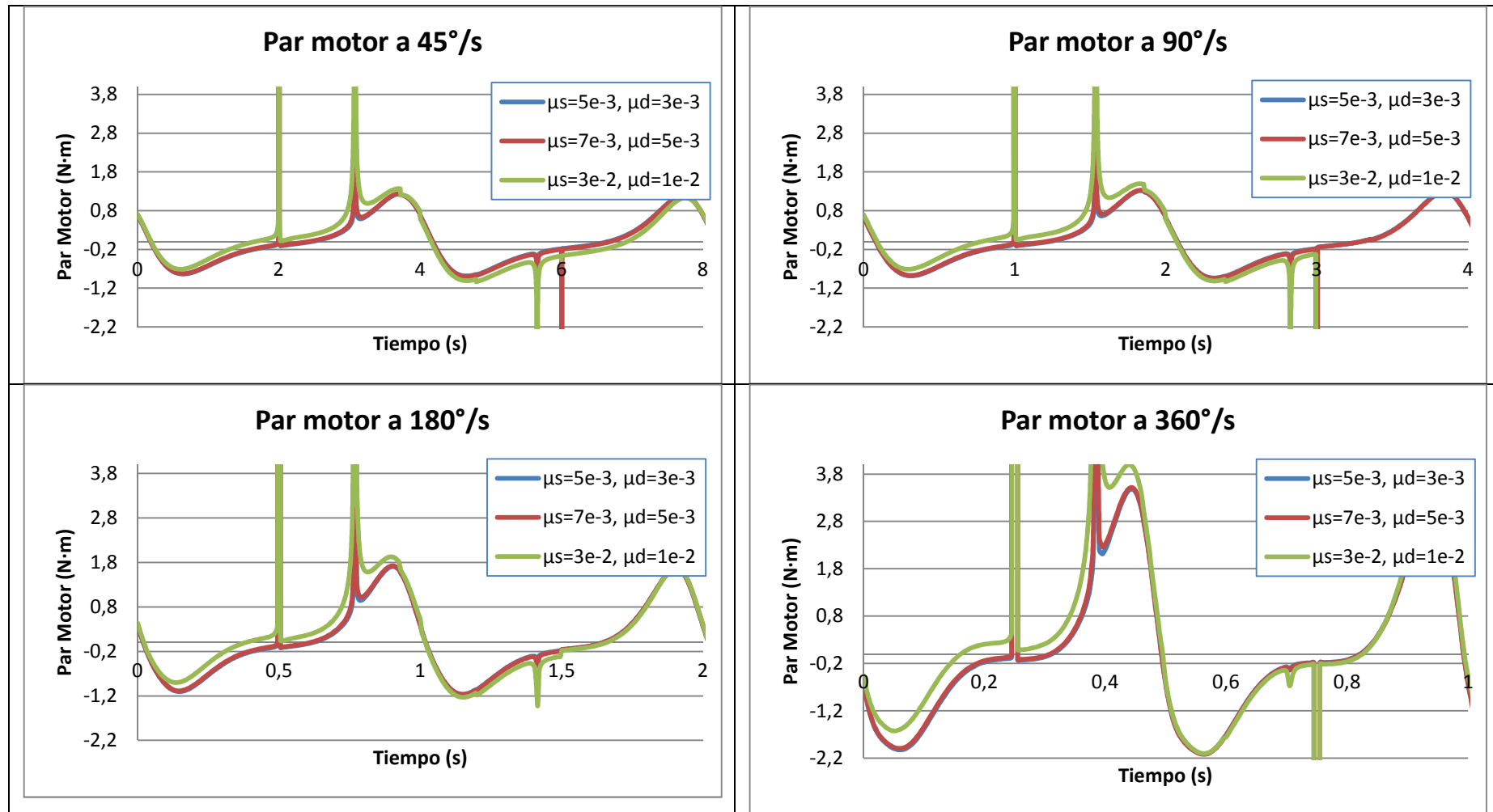


Gráfico 6.23 Par motor modelo restringido juntas rev. distintas vel. durante un ciclo



Para $45^\circ/\text{s}$ y $90^\circ/\text{s}$ los resultados obtenidos del par son prácticamente iguales. Para la velocidad de $180^\circ/\text{s}$, el par aumenta $0,8 \text{ N}\cdot\text{m}$ aproximadamente, mientras que para una velocidad de giro de $360^\circ/\text{s}$ el par se duplica.

Como ya se comentó anteriormente, se producen una serie de picos como consecuencia de la implementación de la fricción en las juntas de rotación, y que antes al no tener, permanecían ausentes.

Los picos producidos, permaneciendo ahora en las gráficas de un solo ciclo, se observa cómo quedan situados en la misma posición de giro de la manivela, notándose gran diferencia en una velocidad de giro de $360^\circ/\text{s}$.

6.1.1.2.3 ANÁLISIS CON FRICCIÓN EN LAS JUNTAS TRASLACIONALES

Una vez mostrados los resultados sólo con las juntas rotacionales, se procede al estudio completo de fricción con las juntas rotacionales y las traslacionales. Para ello se tendrán en cuenta las deslizaderas superior e inferior, de ambos lados de la cadera.

Las juntas traslacionales se crean siguiendo el modelo del manual presente en este proyecto. Para ello se selecciona cada una de las juntas y se procede a modificar sus propiedades de fricción para lo cual se tendrán en cuenta los siguientes datos:

- *Mu Static (Mu Estática)*: Define el coeficiente de fricción estático en la articulación. La magnitud de la fuerza de fricción es el producto de Mu Static y la magnitud de la fuerza normal de la articulación. La fuerza de fricción estática actúa para oponerse a la fuerza neta o el par a lo largo de los grados de libertad de la articulación.

Mu Static del ensayo = 0,03

- *Mu Dynamic (Mu Dinámica)*: Define el coeficiente de fricción dinámica. La magnitud de la fuerza de fricción es el producto de Mu Dynamic y la magnitud de la fuerza normal de la articulación. La fuerza de fricción dinámica actúa en la dirección opuesta a la velocidad de la articulación.

- **Mu Dynamic del ensayo = 0,01**

- *Reaction Arm (Brazo de reacción)*: Define el momento efectivo del brazo del par de reacción de la junta sobre el eje axial de la articulación de traslación (la dirección z de la junta es el marker J). Este valor se utiliza para calcular la contribución del momento de torsión para la fuerza neta de fricción.

- **Reaction Arm = 0,001**

- *Overlap Will (Superposición o solapamiento)* Para definir la fricción en una junta traslacional, ADAMS/Solver calcula la superposición de la articulación. Como las deslizaderas comunes, la coincidencia puede aumentar, disminuir o permanecer constante.

Remain Constant (permanece constante): Indica que la cantidad de superposición no cambia como en la deslizadera de las juntas; toda la superposición se mantiene dentro de la articulación.

- *Stiction Transition Velocity (Velocidad de transición de la fricción estática):* Define el umbral de velocidad absoluta para la transición desde la fricción dinámica hasta la fricción estática. Si la velocidad absoluta relativa del “marker” de la articulación es inferior al valor, entonces la fricción estática actúa para hacer la articulación conjunta.

Stiction Transition Velocity del ensayo = 0,1

- *Max Stiction Deformation (Máxima deformación de la fricción estática):* Define el desplazamiento máximo que se puede dar en una articulación, una vez que la fuerza de fricción en la articulación entra en régimen de fricción estática. La ligera deformación permite a ADAMS solucionar fácilmente las condiciones de Coulomb para la fricción estática.

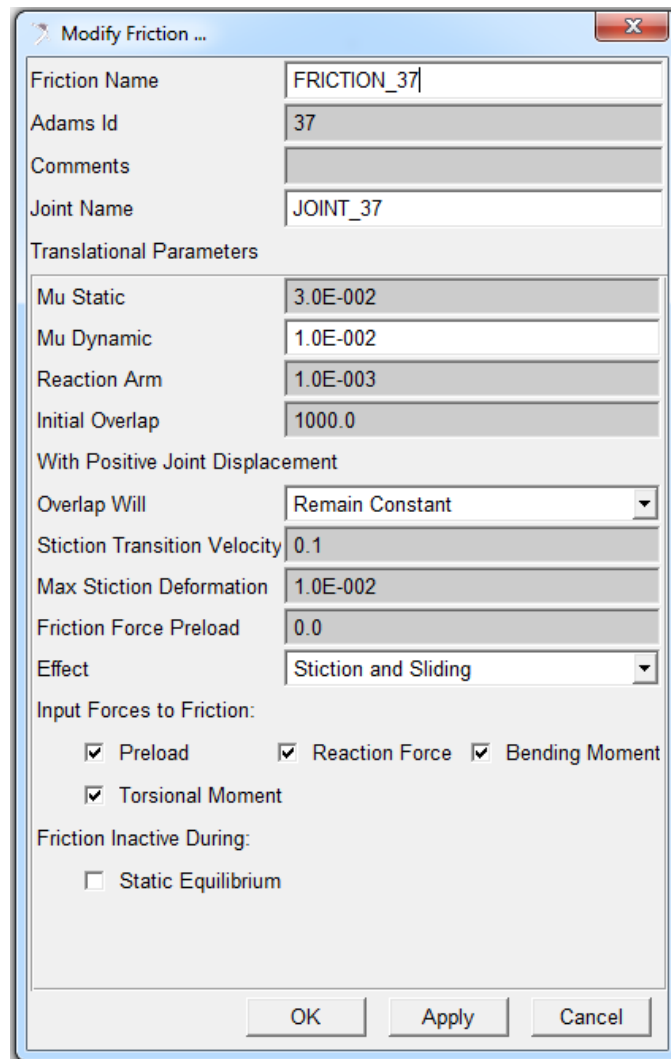
Max Stiction Deformation del ensayo = 0,01

- *Effect (Efecto):* Define los efectos de fricción en el modelo de fricción, ya sea fricción estática y de deslizamiento, fricción estática o de deslizamiento. Fricción estática es un efecto de fricción estática, mientras que el deslizamiento es un efecto de fricción dinámica. Excluyendo fricción estática en simulaciones que no lo requieran, se puede mejorar en gran medida la velocidad de simulación. El valor predeterminado es fricción estática y de deslizamiento.

Effect del ensayo = Stiction and Sliding

- *Input Forces to Friction (Fuerzas de entrada para la fricción):* Define las fuerzas de entrada para el modelo de fricción. Por defecto, todas las precargas definidas por el usuario y la fuerza de reacción en la articulación y momentos están incluidas. Se puede personalizar el modelo de fricción de la fuerza mediante la limitación de las fuerzas de entrada que se especifique. Las entradas para un conjunto de traslación.

Input Forces to Friction del ensayo $\left\{ \begin{array}{l} \text{Precarga} \\ \text{Fuerza de reacción} \\ \text{Momento de flexión} \\ \text{Momento de torsión} \end{array} \right\}$



Friction Name	FRICION_37
Adams Id	37
Comments	
Joint Name	JOINT_37
Translational Parameters	
Mu Static	3.0E-002
Mu Dynamic	1.0E-002
Reaction Arm	1.0E-003
Initial Overlap	1000.0
With Positive Joint Displacement	
Overlap Will	Remain Constant
Stiction Transition Velocity	0.1
Max Stiction Deformation	1.0E-002
Friction Force Preload	0.0
Effect	Stiction and Sliding
Input Forces to Friction:	
<input checked="" type="checkbox"/> Preload	<input checked="" type="checkbox"/> Reaction Force
<input checked="" type="checkbox"/> Torsional Moment	<input checked="" type="checkbox"/> Bending Moment
Friction Inactive During:	
<input type="checkbox"/> Static Equilibrium	

Figura 6.3 Propiedades de fricción de una junta traslacional a ensayo

Una vez definidas las propiedades de las juntas traslacionales, se implementan en MSC Adams las fricciones provocadas por cada una de las juntas con un total de 4 (Friction_37 a Friction_40), y se realiza el estudio para comprobar si la fricción debida a las juntas traslacionales provoca singularidades o cambios significativos en el par necesario o la cinemática del robot. Para este estudio se han tomado las mismas velocidades que para los estudios anteriores: 45°/s, 90°/s, 180°/s y 360°/s.

En primer lugar hay que definir los coeficientes de rozamiento empleados “Mu Static” y “Mu Dinamic”.

Se realizarán varias simulaciones variando los parámetros anteriormente nombrados para ver su influencia sobre el par del motor. Los parámetros utilizados serán los siguientes.

- $\mu_s=5e-3$ y $\mu_d=3e-3$
- $\mu_s=3e-3$ y $\mu_d=1e-3$
- $\mu_s=3e-2$ y $\mu_d=1e-2$

Al igual que en el estudio realizado para la fricción en las juntas de revolución, para la realización de las distintas simulaciones, se ha doblado el tiempo de estudio, pasando éste a ser de 8 segundos en lugar de 4 segundos. El motivo por el cual se ha producido este cambio es porque al introducirles fricciones a las juntas se producen unos picos en las dos primeras vueltas de la manivela. Pasadas esas dos vueltas el par obtenido describe una curva periódica.

En primer lugar, el par obtenido para las distintas velocidades de giro es el siguiente:

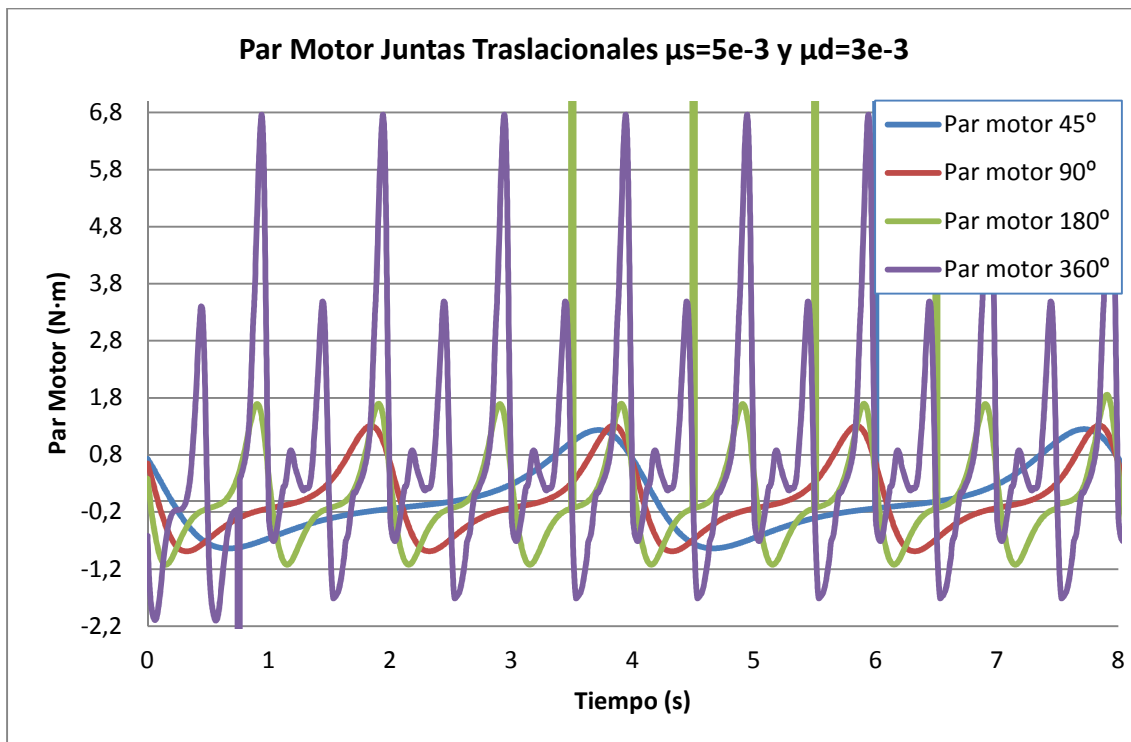


Gráfico 6.24 Par motor modelo restringido juntas traslación ($\mu_s=5e-3$ y $\mu_d=3e-3$)

Comparativa del par obtenido para cada una de las velocidades estudiadas para unos valores de $\mu_s=5e-3$ y $\mu_d=3e-3$

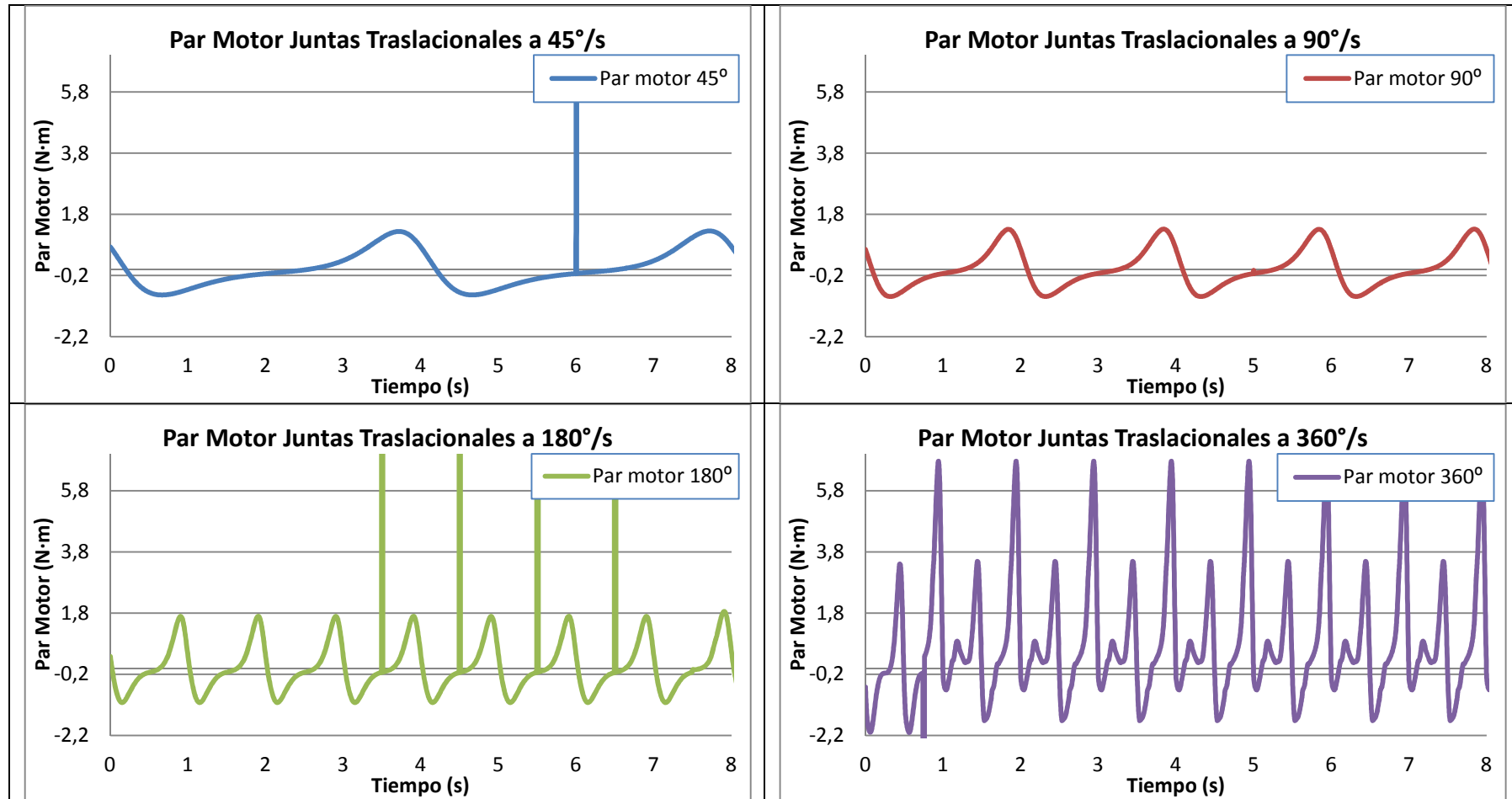


Gráfico 6.25 Par motor juntas tras. ($\mu_s=5e-3$ y $\mu_d=3e-3$) distintas vel. durante 8seg

Comparativa del par obtenido para cada una de las velocidades estudiadas para unos valores de $\mu_s=5e-3$ y $\mu_d=3e-3$ en un ciclo de giro de la manivela

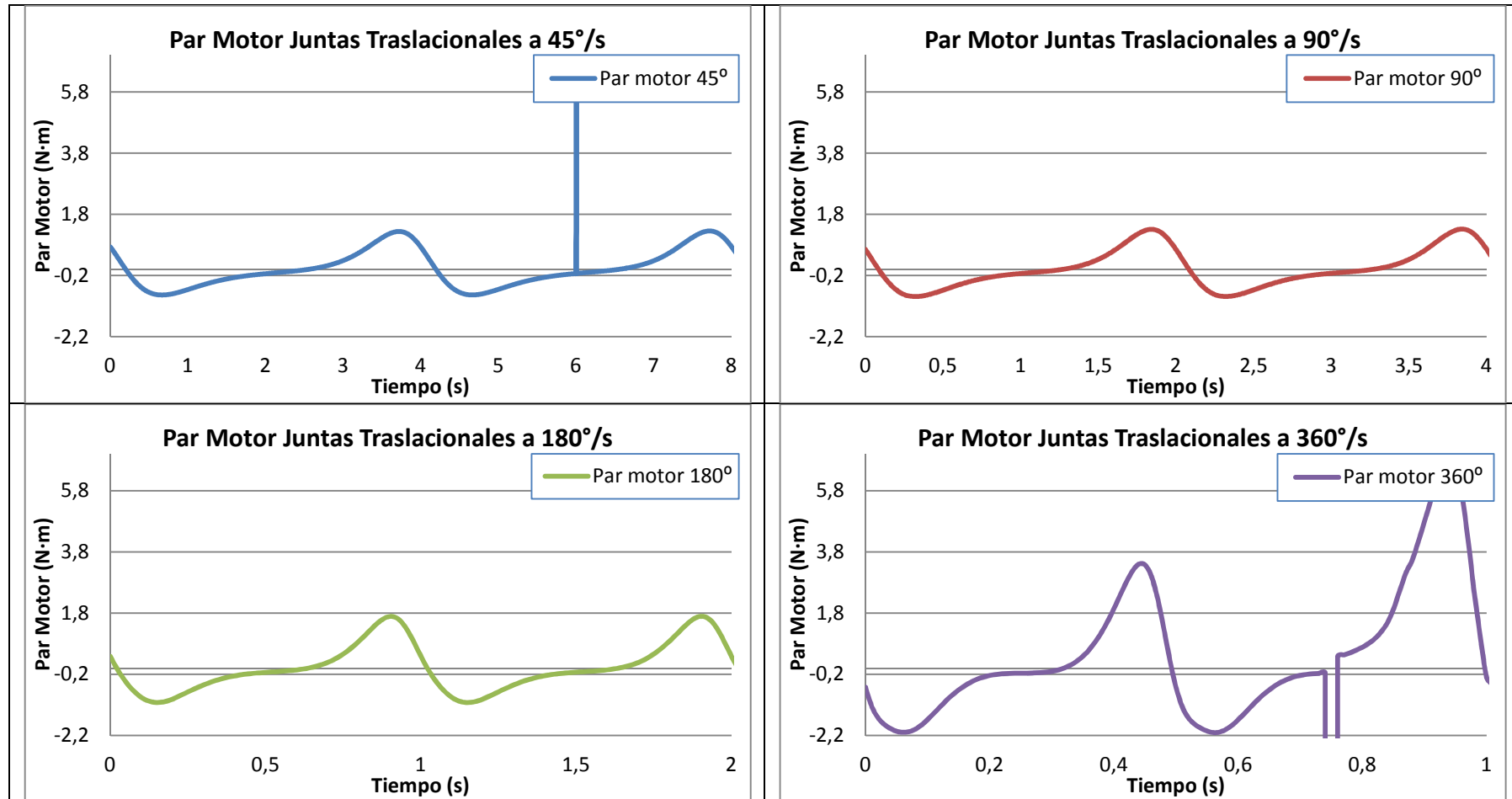


Gráfico 6.26 Par motor juntas tras. ($\mu_s=5e-3$ y $\mu_d=3e-3$) distintas vel. durante un ciclo

En segundo lugar, el par obtenido para las distintas velocidades de giro es el siguiente:

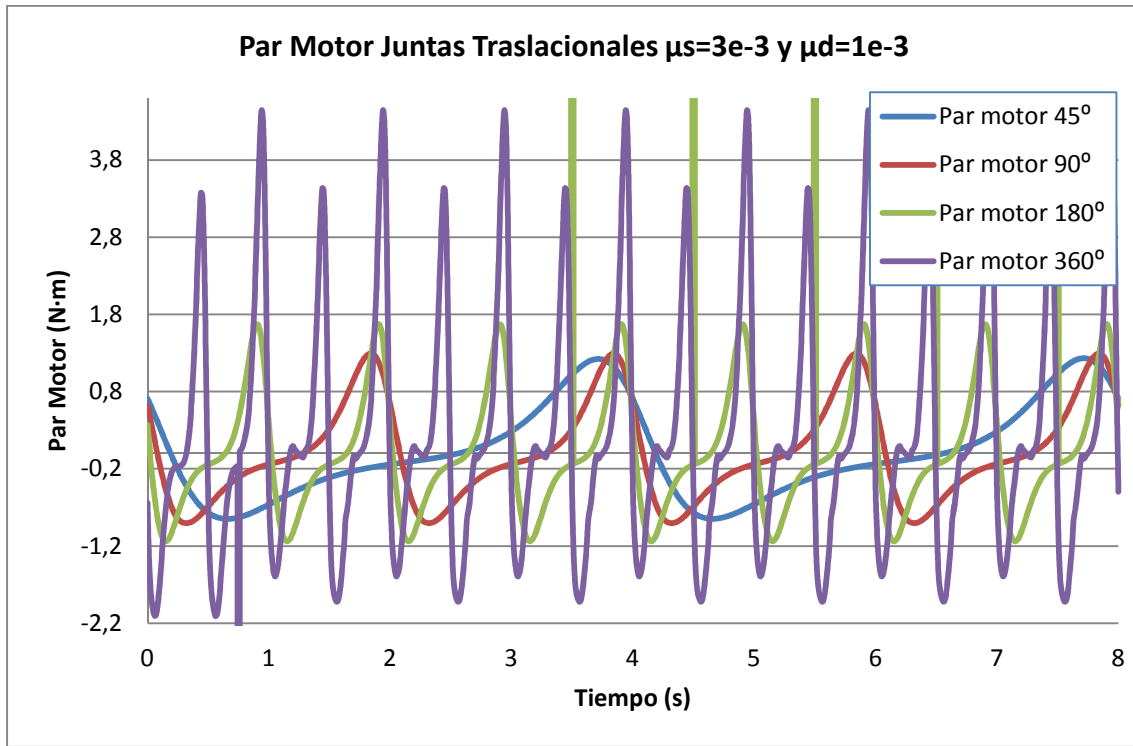


Gráfico 6.27 Par motor modelo restringido juntas traslación ($\mu_s=3e-3$ y $\mu_d=1e-3$)

Comparativa del par obtenido para cada una de las velocidades estudiadas para unos valores de $\mu_s=3e-3$ y $\mu_d=1e-3$

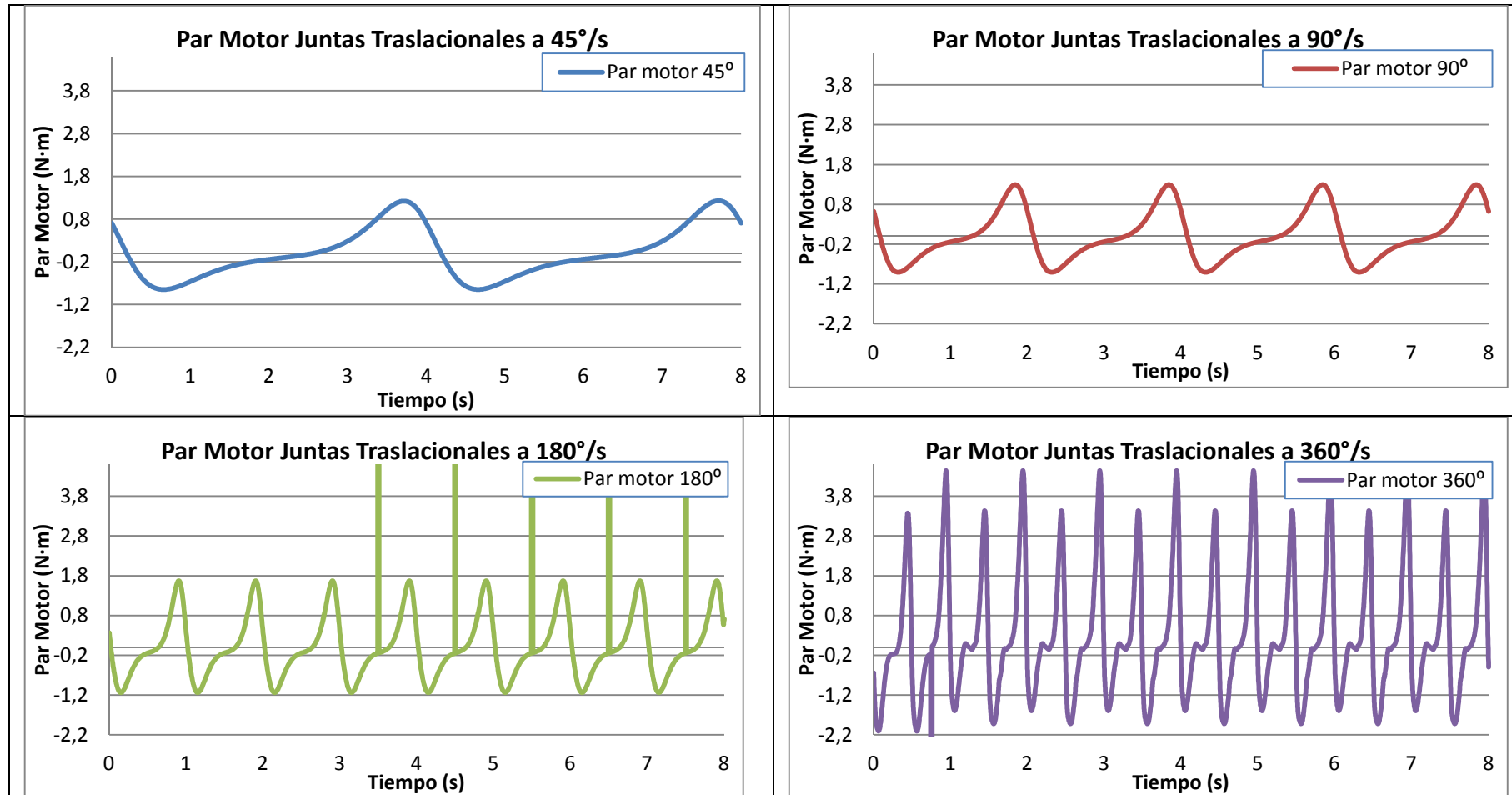


Gráfico 6.28 Par motor juntas tras. ($\mu_s=3e-3$ y $\mu_d=1e-3$) distintas vel. durante 8seg

Comparativa del par obtenido para cada una de las velocidades estudiadas para unos valores de $\mu_s=3e-3$ y $\mu_d=1e-3$ en un ciclo de giro de la manivela

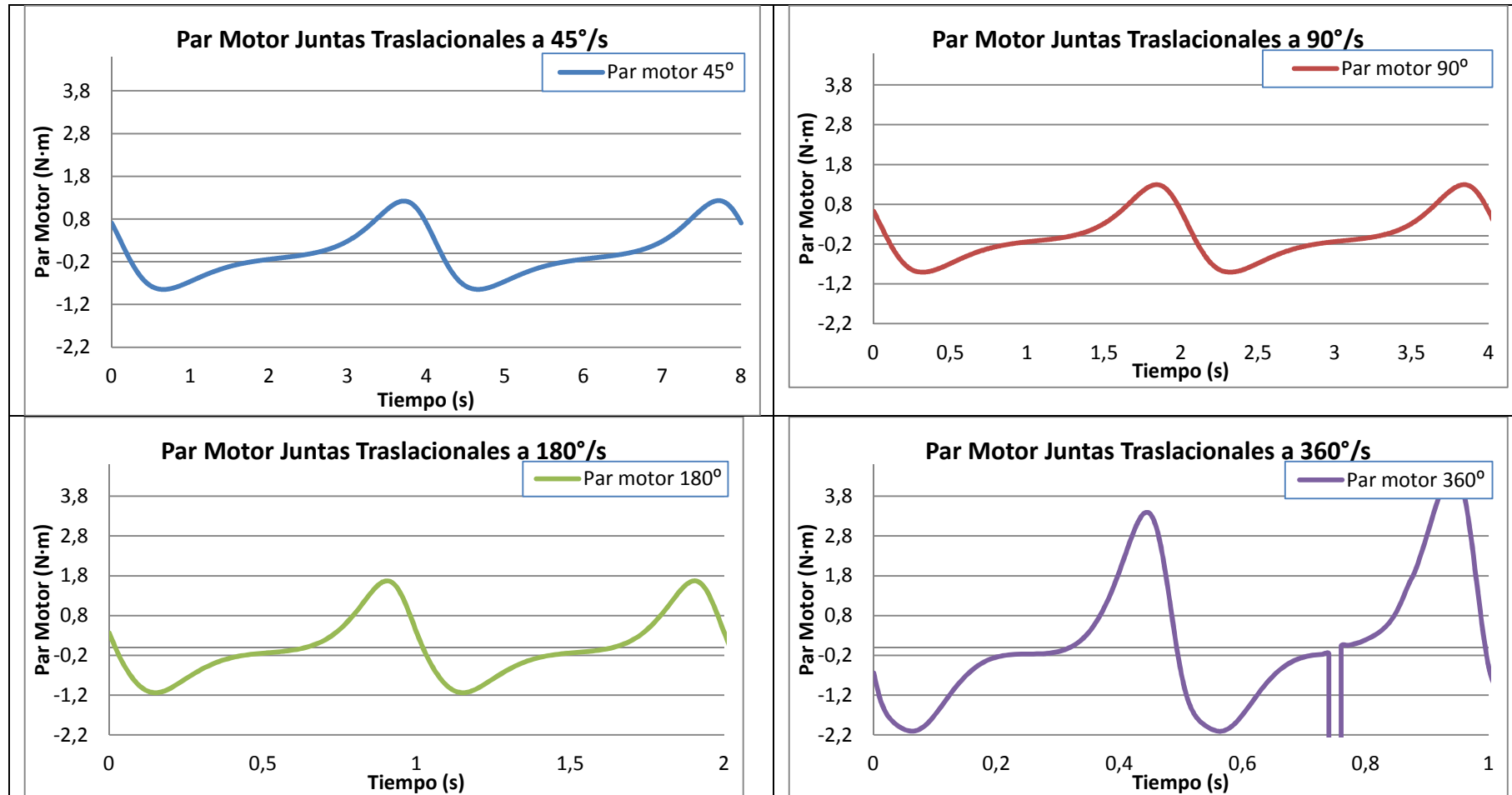


Gráfico 6.29 Par motor juntas tras. ($\mu_s=3e-3$ y $\mu_d=1e-3$) distintas vel. durante un ciclo

En tercer lugar, el par obtenido para las distintas velocidades de giro es el siguiente:

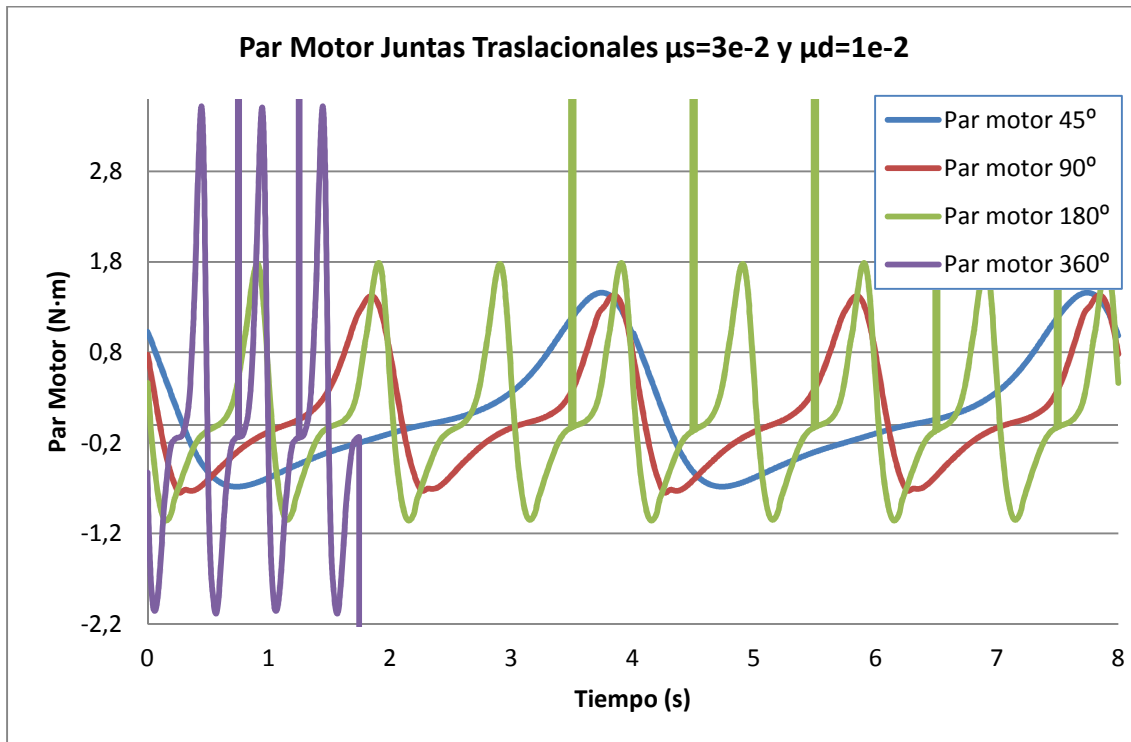


Gráfico 6.30 Par motor modelo restringido juntas traslación ($\mu_s=3e-2$ y $\mu_d=1e-2$)

Comparativa del par obtenido para cada una de las velocidades estudiadas para unos valores de $\mu_s=3e-2$ y $\mu_d=1e-2$

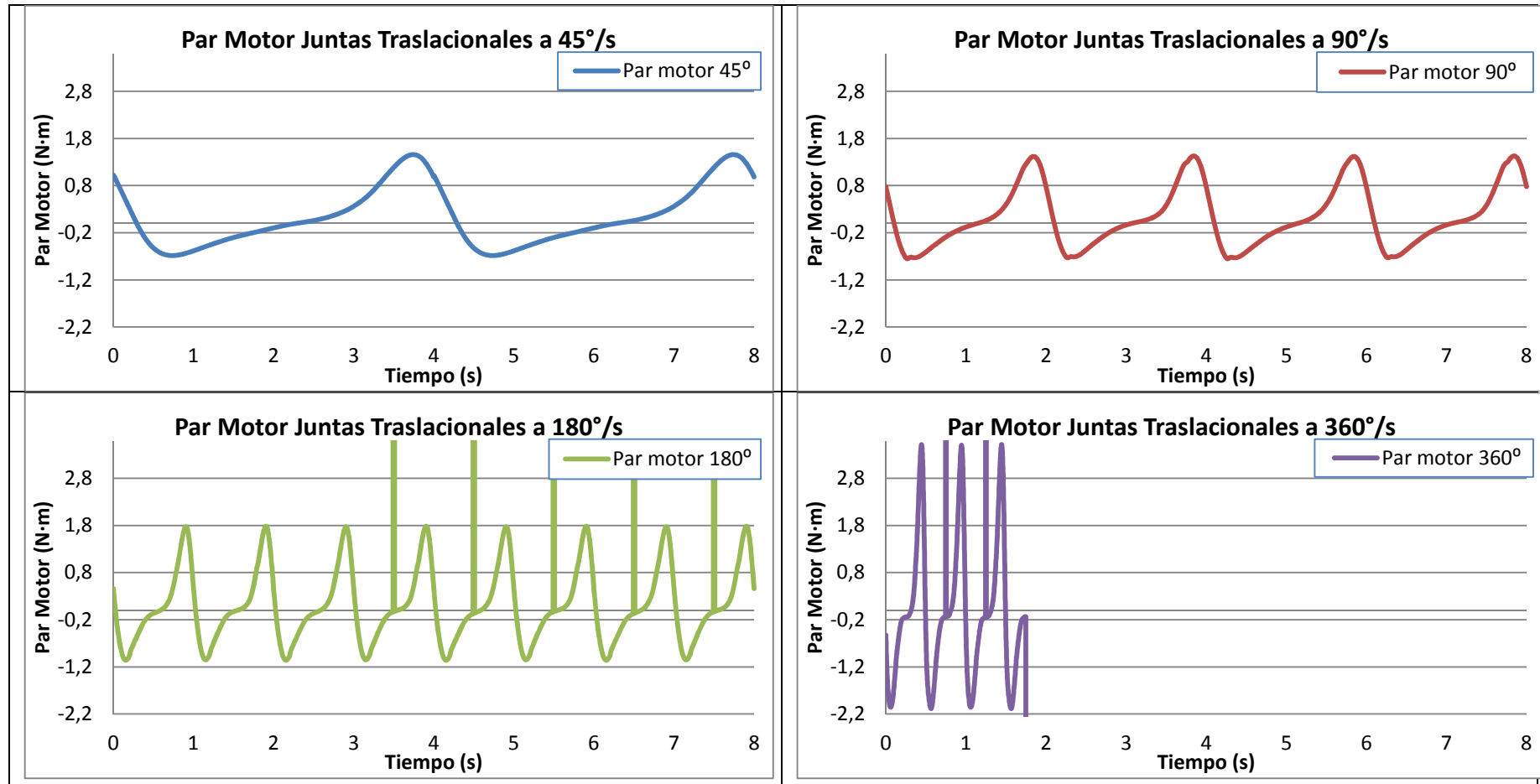


Gráfico 6.31 Par motor juntas tras. ($\mu_s=3e-2$ y $\mu_d=1e-2$) distintas vel. durante 8seg

Comparativa del par obtenido para cada una de las velocidades estudiadas para unos valores de $\mu_s=3e-2$ y $\mu_d=1e-2$ en un ciclo de giro de la manivela

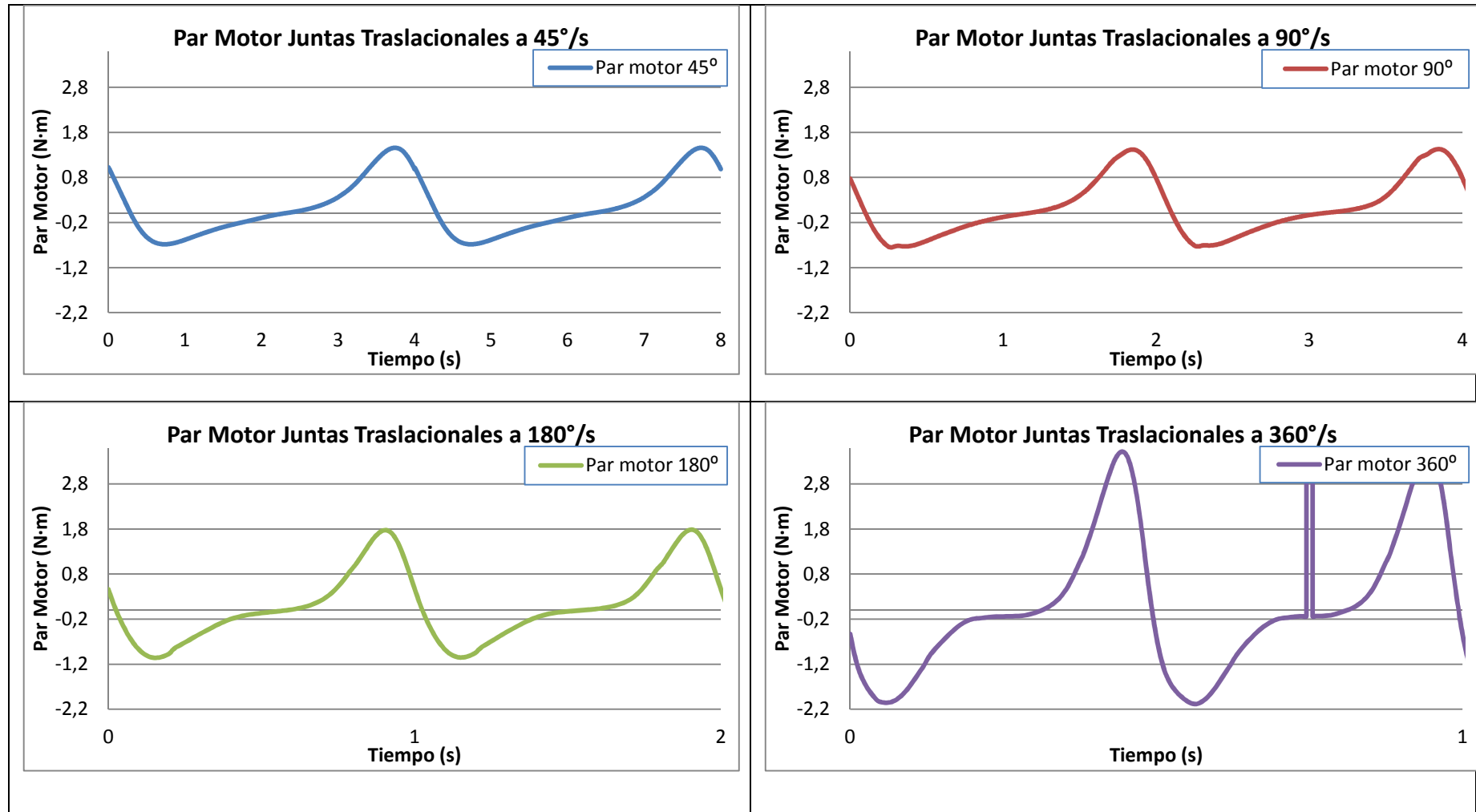


Gráfico 6.32 Par motor juntas tras. ($\mu_s=3e-2$ y $\mu_d=1e-2$) distintas vel. durante un ciclo



Al igual que en el estudio realizado con fricción en las juntas de revolución, los resultados obtenidos para las distintas simulaciones con fricción en las juntas traslacionales, denotan que únicamente se produce una diferencia considerable para la velocidad de estudio mayor, es decir, $360^\circ/\text{s}$. Para el resto de velocidades apenas se produce alguna variación en el par, independientemente de los valores de fricción introducidos en el programa.

Por tanto, se puede concluir, que la implementación de fricción en las juntas de traslación, al igual que en las de revolución, sólo tiene una influencia considerable para la velocidad mayor que se ha tomado en este estudio, $360^\circ/\text{s}$.

Para la simulación de fricciones mayores, $\mu_s=3\text{e-}3$ y $\mu_d=1\text{e-}$, el programa para $360^\circ/\text{s}$ da error, cosa que se puede apreciar en la gráfica (Gráfico 6.30). Para las otras dos simulaciones, en la que tiene los coeficientes menores ($\mu_s=3\text{e-}3$ y $\mu_d=1\text{e-}3$) se obtiene un par sensiblemente inferior respecto a la que tiene los coeficientes intermedios ($\mu_s=5\text{e-}3$ y $\mu_d=3\text{e-}3$).

Finalmente, se procederá a la comparación de los distintos valores asignados a las juntas de traslación para cada una de las velocidades de estudio:

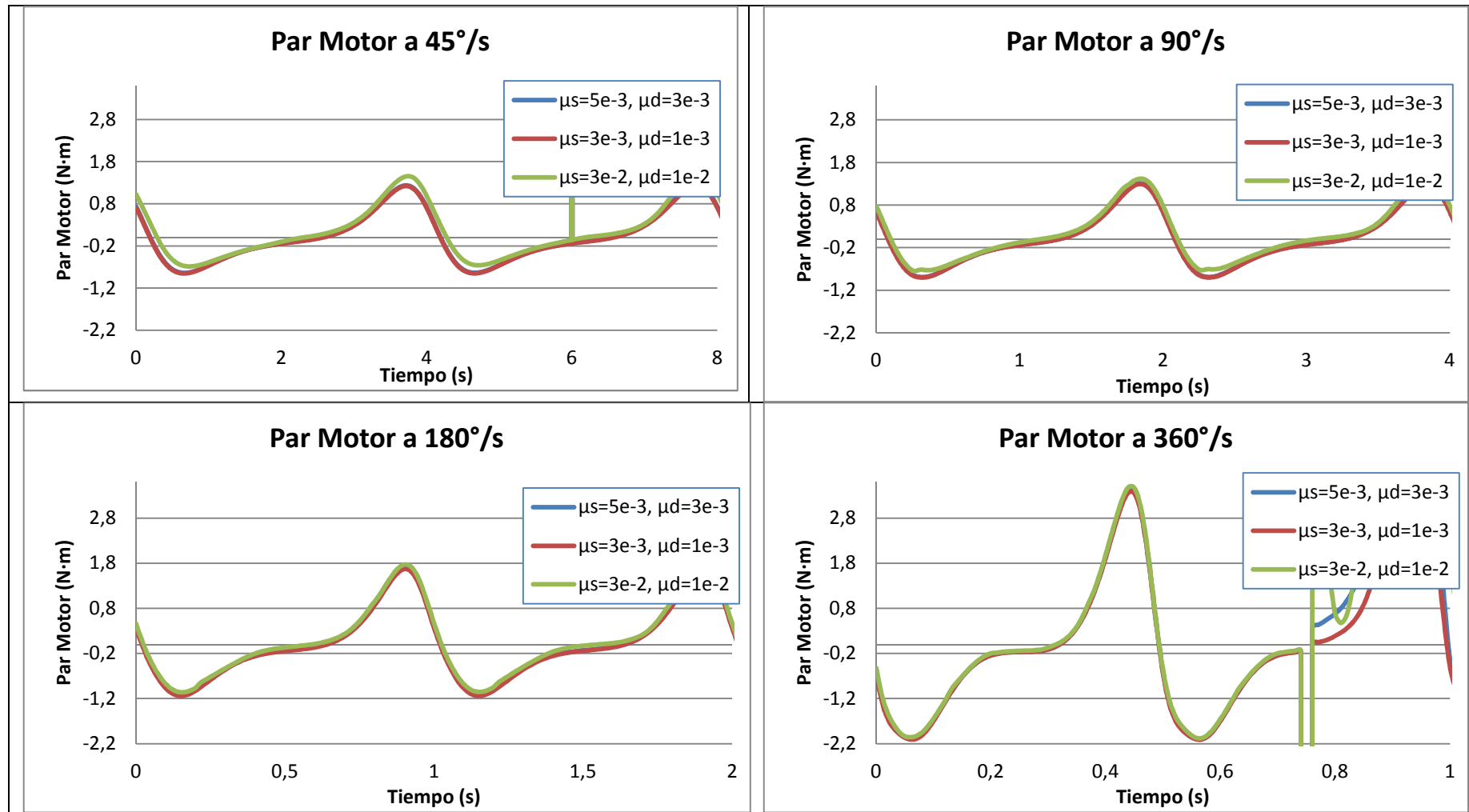


Gráfico 6.33 Par motor modelo restringido juntas tras distintas vel. durante un ciclo



Para $45^\circ/\text{s}$ y $90^\circ/\text{s}$ los resultados obtenidos del par son prácticamente iguales. Para la velocidad de $180^\circ/\text{s}$ el par aumenta $0,8 \text{ N}\cdot\text{m}$ aproximadamente, mientras que para una velocidad de giro de $360^\circ/\text{s}$ el par se duplica.

Como ya se comentó anteriormente, se producen una serie de picos como consecuencia de la implementación de la fricción en las juntas de rotación, y que antes al no tener, permanecían ausentes.

Los picos producidos, permaneciendo ahora en las gráficas de un solo ciclo, se observa cómo quedan situados en la misma posición de giro de la manivela, notándose gran diferencia en una velocidad de giro de $360^\circ/\text{s}$.

6.1.1.2.4 ANÁLISIS CON FRICCIÓN EN LAS JUNTAS ROTACIONALES Y TRASLACIONALES

Por último lugar, se procede al análisis del comportamiento del robot ante la implementación de fricción en cada una de sus juntas de rotación y traslación.

Anteriormente se han tomado varios valores para la fricción en cada una de las juntas. En vistas de los resultados descritos con anterioridad, se han tomado los valores mencionados a continuación, por no presentar ningún problema sus respectivas simulaciones y obtener unos resultados ausentes de irregularidades.

- Para las juntas rotacionales $\mu_s=5e-3$ y $\mu_d=3e-3$
- Para las juntas traslacionales $\mu_s=3e-3$ y $\mu_d=1e-3$

Una vez establecidos los distintos parámetros de fricción, se muestran los resultados obtenidos para cada una de las velocidades de estudio.

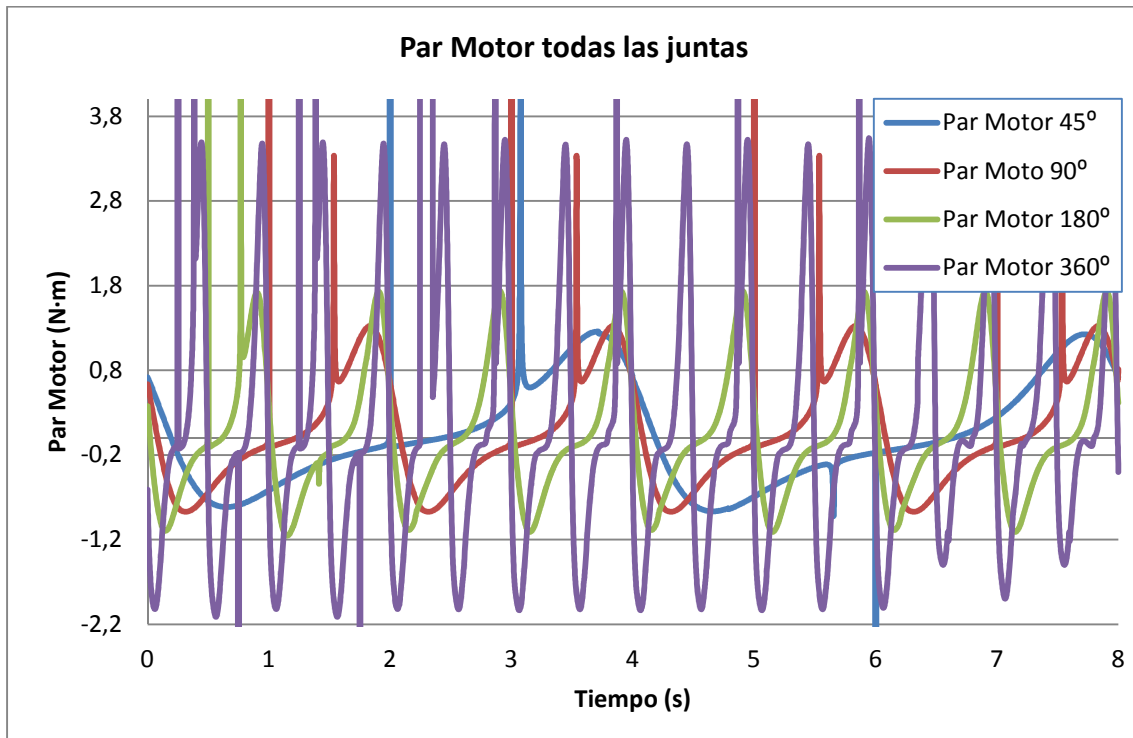


Grafico 6.34 Par motor modelo restringido todas las juntas

Comparativa del par obtenido para cada una de las velocidades estudiadas con fricción en todas las juntas

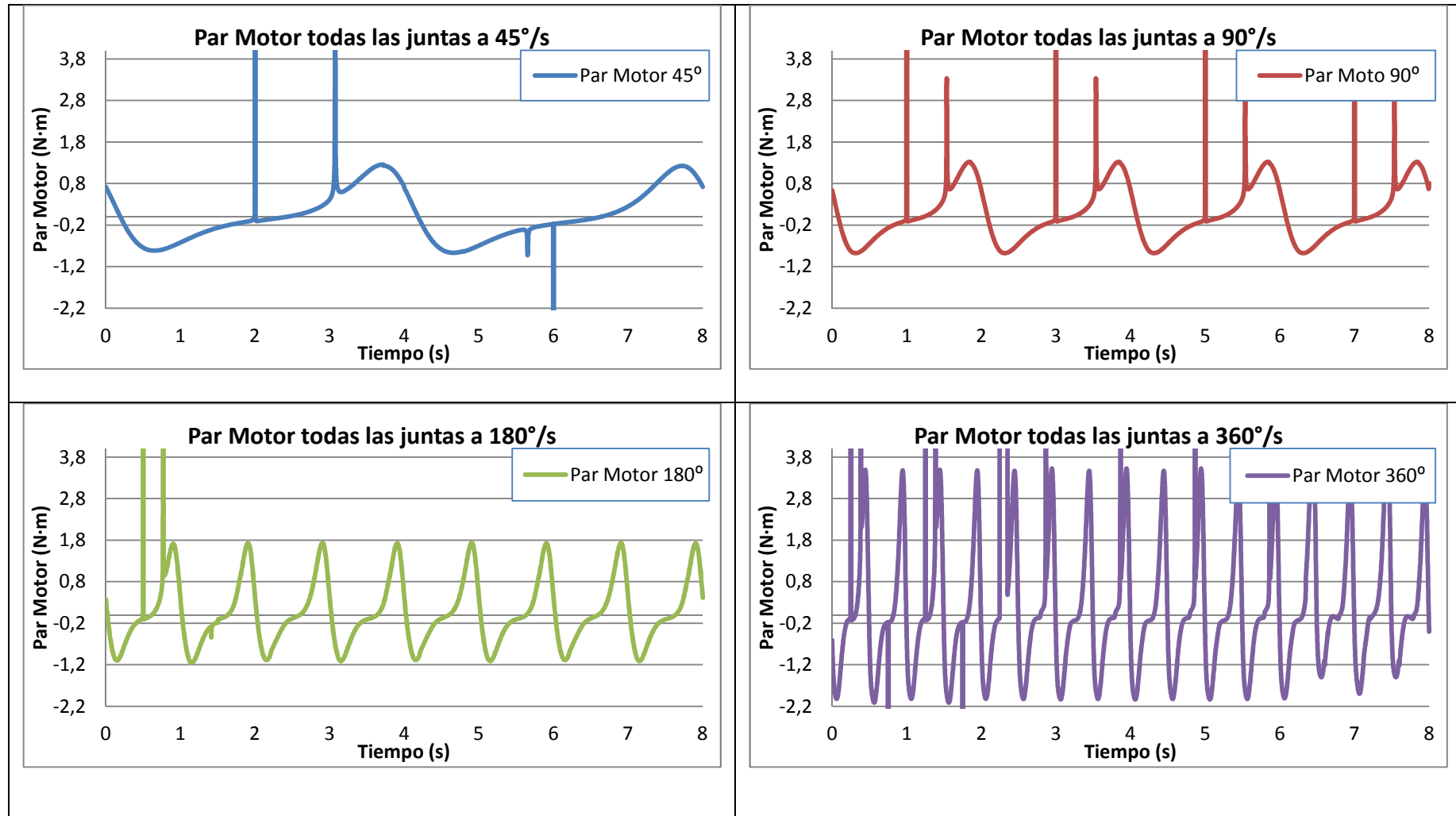


Gráfico 6.35 Par motor todas las juntas distintas vel. durante 8seg

Comparativa del par obtenido para cada una de las velocidades estudiadas con fricción en todas las juntas en un ciclo de giro de la manivela

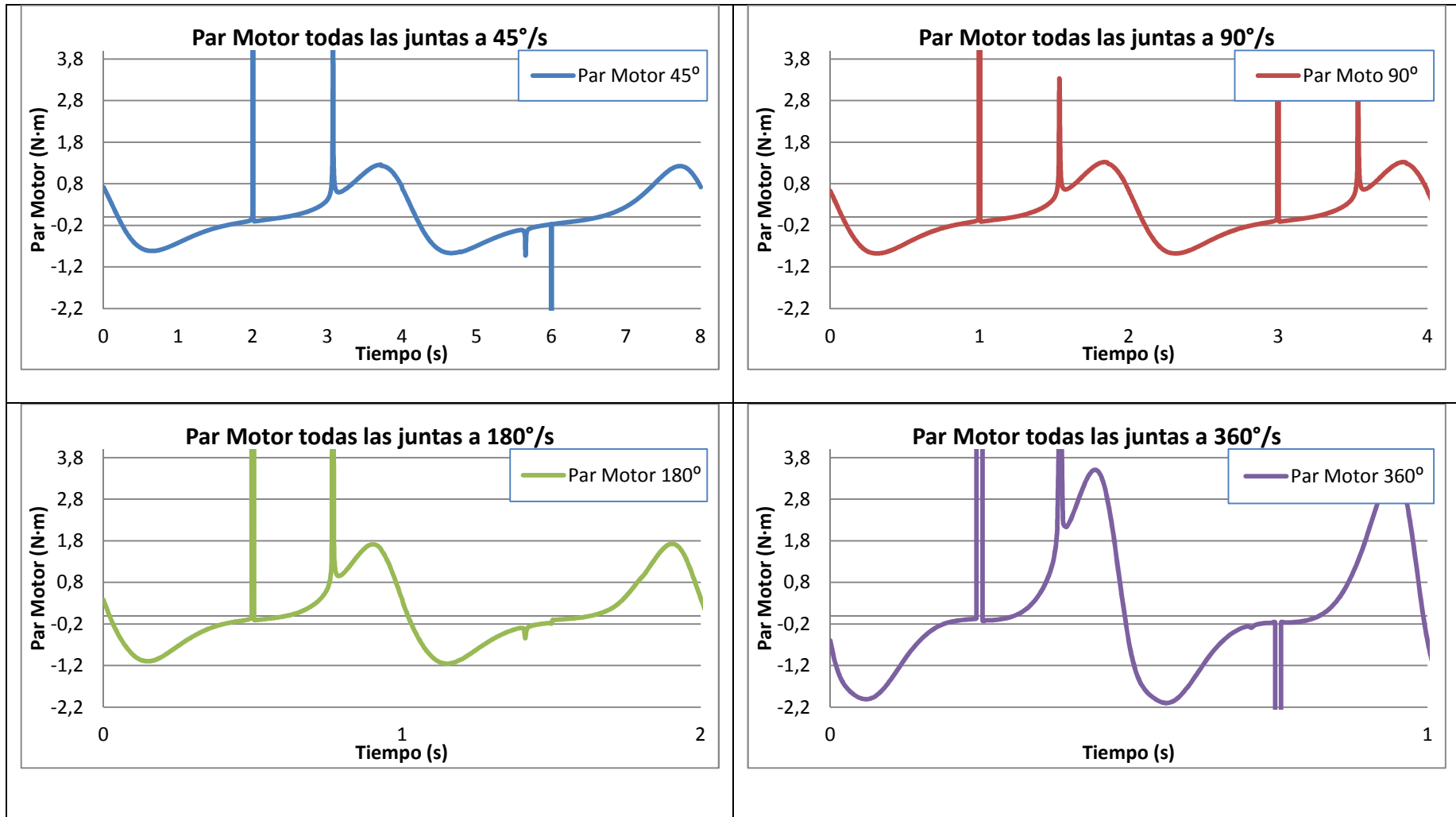


Gráfico 6.36 Par motor todas las juntas distintas vel. durante un ciclo



Una vez obtenidos los resultados del modelo final, se pueden sacar varias conclusiones, siempre y cuando teniendo en cuenta los valores elegidos para la simulación de fricciones tanto para juntas de revolución como para las juntas de traslación:

El par obtenido para cada una de las velocidades tanto en el modelo sin fricción como en el modelo implementado con fricción en todas sus juntas es muy similar, por lo que se puede concluir que la implementación de éstas no afecta de manera significativa sobre el par.

El hecho de que haya fricciones implica unos mayores picos en el par cuando el robot comienza a dar el paso. Una vez transcurrido un cierto tiempo, menor cuanto mayor sea la velocidad de giro de la manivela, éste par se comporta de forma periódica. Cabe destacar, que de acuerdo a las simulaciones, para velocidades bajas hay una presencia de picos mayores que para velocidades altas de giro.



Capítulo 7:

Conclusiones y trabajos futuros

7.1 CONCLUSIONES

Al final del presente proyecto se puede concluir afirmando que se han alcanzado con éxito todos y cada uno de los objetivos propuestos al comienzo del mismo.

Las conclusiones obtenidas se han elaborado comparando los resultados del estudio realizado en el presente proyecto (modelo colgado o restringido) frente a los resultados obtenidos por Germán García Marcos (modelo suelo o andante)

Se ha conseguido cumplir a plena satisfacción el objetivo principal, se ha realizado el análisis de la influencia de los parámetros de contacto en MSC Adams, sobre diferentes modelos del robot bípedo PASIBOT.

- Utilizando el programa *Working model*, se ha realizado un estudio del movimiento del modelo simplificado y se ha verificado su integridad.
- Se realizó un análisis de los diferentes parámetros de contacto con los que cuenta MSC Adams y se ha realizado un manual para la implementación de las fricciones en juntas de revolución y traslacionales, así como de los parámetros de contacto entre dos superficies.
- Por medio de MSC Adams, se estudió el comportamiento de los distintos parámetros en juntas de revolución y traslacionales, así como los parámetros de contacto entre dos superficies en mecanismos simples.
- Se realizó un análisis cinemático en los diferentes modelos de PASIBOT, modelo colgado y modelo andante, en el cual se verifica el correcto funcionamiento del robot.
- Con objeto de estudio dos modelos del bípedo PASIBOT, modelo colgado (restringido) y modelo andante (libre), se estudia las características mecánicas de

los distintos elementos, así como el número exacto de juntas con su función, posición y tipo.

- El estudio sobre los distintos modelos fue satisfactorio y se han obtenido resultados para la implementación de juntas, así como el comportamiento dinámico entre dos superficies, en el presente proyecto el bípodo PASIBOT frente al suelo sobre el cual se desplaza.

Una vez realizado el estudio se puede afirmar en lo referente al bípodo PASIBOT que las fricciones en las juntas de revolución no producen una demanda de par significativa comparándolo con el mismo sistema sin fricciones, es reseñable que en el presente modelo simplificado del PASIBOT consta de 36 juntas de revolución y tan solo 4 juntas traslacionales.

Así mismo se puede afirmar que las juntas traslacionales si influyen en el comportamiento del mecanismo con un impacto mayor sobre la demanda de par, y son estas simulaciones junto a las en que están implementadas tanto juntas de revolución y traslacionales, las más sensibles a producir errores en su simulación, hecho que se ha producido en los distintos modelos del bípodo PASIBOT a estudio en el presente proyecto.

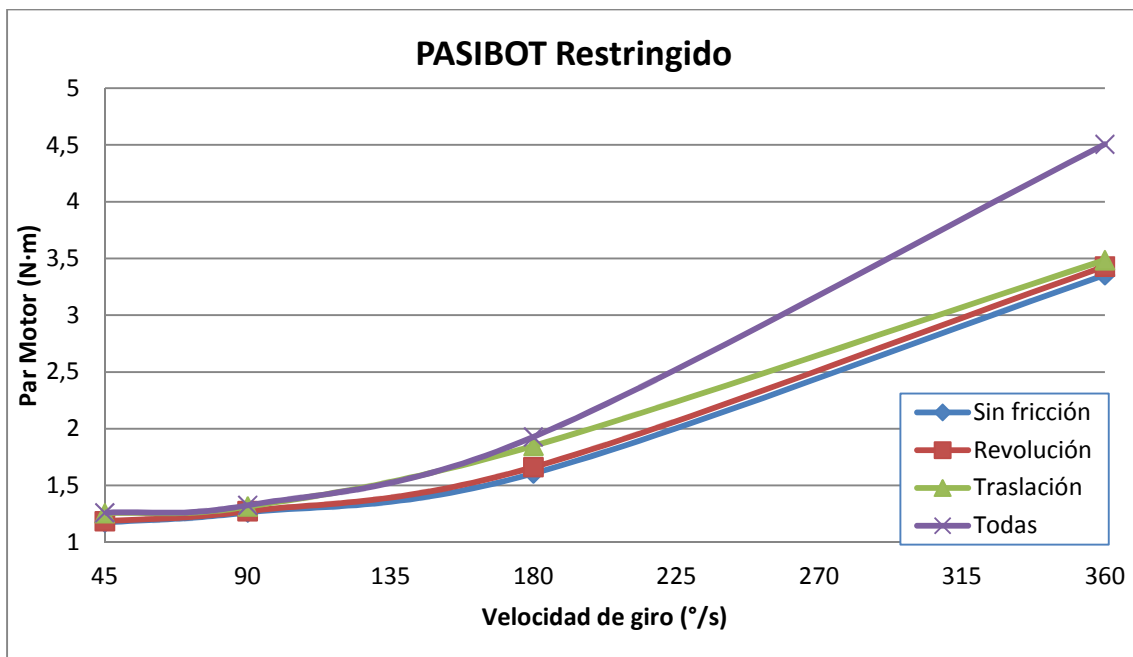


Gráfico 7.1 Par en el PASIBOT restringido

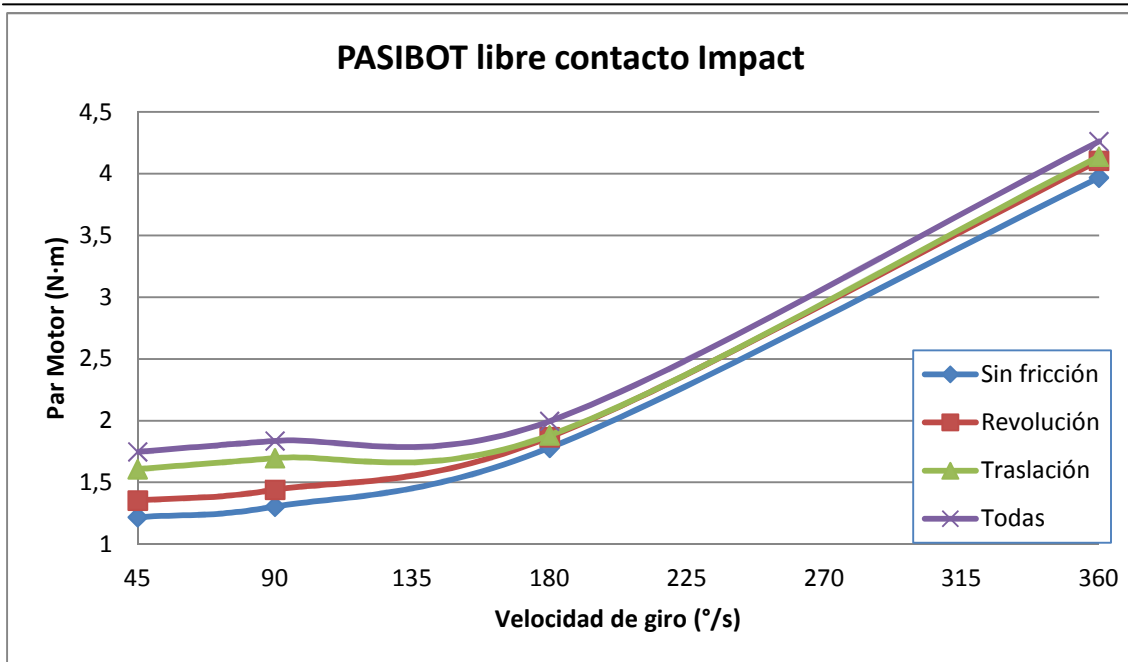


Gráfico 7.2 Par en el PASIBOT libre contacto *Impact*

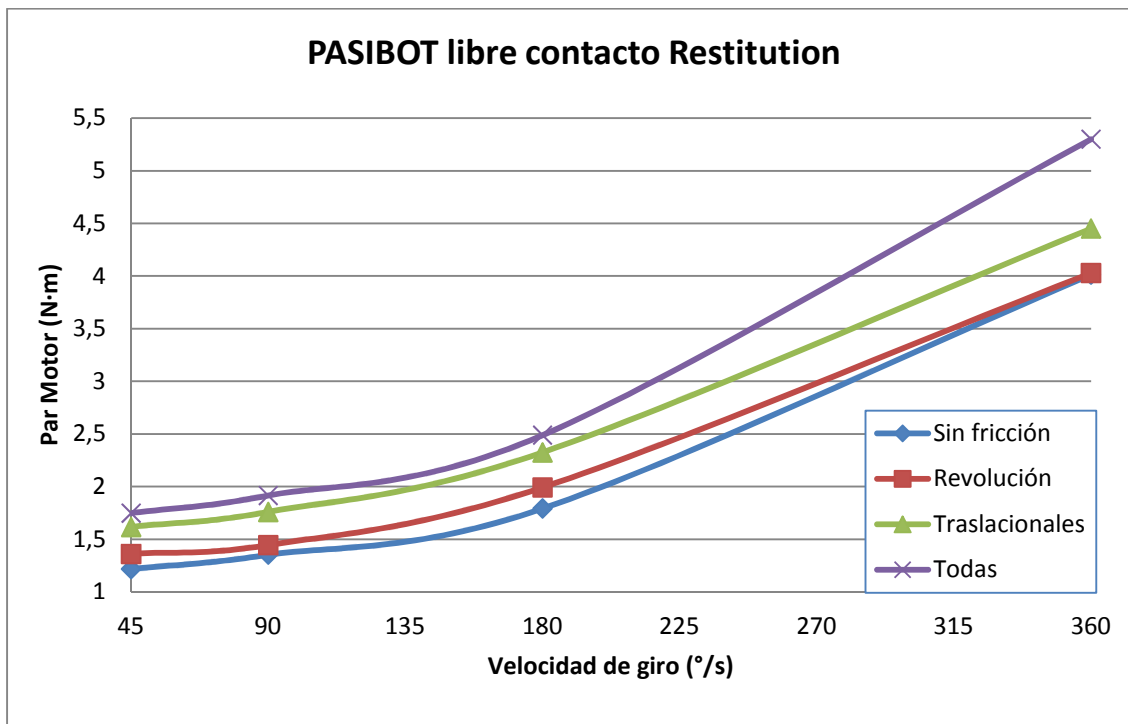


Gráfico 7.3 Par en el PASIBOT libre contacto *Restitution*

Los gráficos anteriores citan la demanda de par en el modelo de suelo para el modelo restringido en primer lugar y para el modelo libre con contacto Impact en segundo lugar y para el tipo de contacto Restitution en último lugar.

Obtenemos de ellos los resultados definitivos de la demanda de par siendo estos resultados semejantes para ambos estudios salvo una distorsión en la velocidad de 360°/s, siendo esta la mas critica; esta distorsión es debida a su vez a que como se puede apreciar en el estudio de restitution existe una continua oscilación de par que aumenta su rango en función de la velocidad y ve su máximo, para la velocidad critica de 360°/s.

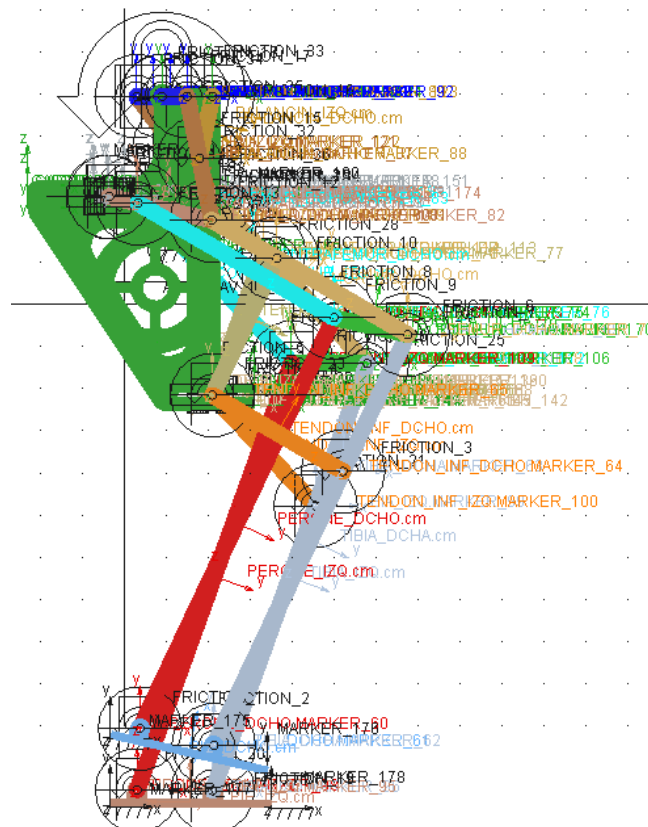


Figura 7.1 Modelo del bípedo PASIBOT en MSC Adams

En el anterior gráfico se puede ver la cantidad de información que debe procesar el programa a la hora de resolver el caso estudiado siendo como se ha citado anteriormente: 36 juntas de revolución, 4 juntas traslacionales en el modelo restringido y sumando a estos los contactos de cada pie respecto del suelo en el modelo libre.

Es destacable apuntar que el programa de cálculo MSC ADAMS, no fue capaz en determinadas ocasiones, de procesar movimientos a altas velocidades bajo fricciones que se consideran bajo estudio y que la influencia que ha demostrado el mismo para determinados números de paso por segundo, determina a su vez variaciones en los errores producidos en instantes que pudiéramos llamar críticos. Así es por tanto que una vez realizado el proyecto se aconseja la simulación con ADAMS; con un “STEP SIZE” dentro del rango (0,01 – 0,005) siendo valores externos al mismo objetos de error.

7.2 FUTUROS DESARROLLOS

Una vez concluido nuestro trabajo, podemos aconsejar que se sigan las siguientes vías de desarrollo para continuar con la mejora del *Pasibot*:

- **Estudio de la influencia de los parámetros de contacto en otros mecanismos complejos**

Una vez obtenidos resultados adecuados para la realización del análisis de contacto en MSC Adams sobre el bípedo PASIBOT, sería interesante realizarlo en otro mecanismo complejo u en otros modelos y posiciones de inicio del bípedo Pasibot y confrontar resultados, una vez ya han sido validados en el presente proyecto.

- **Empleo de diferentes materiales:**

El análisis del bípedo Pasibot construyendo las piezas de otros materiales con enfoque a la integridad del mecanismo, fricciones en las juntas y comportamiento mecánico a diferentes velocidades, y como este interactúa en medios distintos, confrontar resultados según la superficie a estudio.

- **Realización del análisis dinámico en otros programas de cálculo:**

Se debería realizar un análisis por medio de otros software de cálculo y elementos finitos, a fin de obtener estudios de diferentes modelos de fricción, con los cuales confrontar al estudio experimental sobre el modelo real.



Capítulo 8:

Bibliografía



BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Pons, Jose L. —Wearable Robots Biomechatronic Exoskeletons. Ed. Wiley, Inglaterra, 2008.
- [2] Gallardo Mielgo, Jorge. —Estudio de la implementación de habilidades a un robot bípedol, Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2008.
- [3] Eduardo Corral Abad . —Análisis mecánico del robot bípedo Pasibot. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2008.
- [4] López Aláez, Saray. —Estudio cinemático de la pierna de un robot bípedol, Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2009.
- [5] Pérez Caballero, Javier. —Diseño y análisis de un nuevo sistema de estabilización para el robot bípedo Pasibot, Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2009.
- [6] Di Rienzo, Alessandro. —Analisi numerica e sperimentale del meccanismo di una gamba per robot mobilil, Tesi Di Laurea, Università degli Studi di Cassino. Cassino (Italia). 2005.
- [7] A. de Lamadrid; A. de Corral. —Cinemática y Dinámica de Máquinas. Sección de Publicaciones de la ETSIII de la UPM. Madrid, 1969.
- [8] Barrientos, Antonio. Peñín, Luis Felipe. Balaguer, Carlos. Aracil, Rafael. —Fundamentos de la robótica. Ed. McGraw Hill, España 2007.
- [9] Castejón Sisamón, Cristina. —Análisis cinemático de máquinas y mecanismos, Apuntes de la asignatura Teoría de Máquinas, Universidad Carlos III de Madrid. España 2008.
- [10] C. Tavorieri, E. Ottaviano, M. Ceccarelli —Design and Problems of a New Leg-Wheel Walking Robot, 10th CLAWAR International Conference on Climbing and Walking Robots, Singapore (2007).
- [11] C. Tavorieri, E. Ottaviano, M. Ceccarelli, A. Di Rienzo, Analysis and Design of a 1-DOF Leg for Walking Machines, Proceedings of RAAD'06, CD Proceedings. Balantofured, (2006).
- [12] J.E. Shigley. J.J. Uicker . "Teoría de máquinas y mecanismos". Ed. McGraw Hill, México 1988.
- [13] Higinio Rubio, Jesús Meneses, Cristina Castejón, Alberto Jardón, Antonio Giménez, Juan Carlos García Prada. —Pradamechanical design of walking robot Pasibot, Parametric model and gait analysis.



- [14] J. Meneses, C. Castejón, E. Corral, H. Rubio, J.C. García-Prada. —A study of feasibility for a linkable-based —PASIBOT‡ biped robot‡.
- [15] G. Figliolini, —Walking programming for an electropneumatic biped robot,‡ Mechatronics, vol. 9, Dec. 1999, pp. 941-964.
- [16] N. Rodriguez, G. Carbone, and M. Ceccarelli, I, —Design Evolution of Low-cost Humanoid Robot CALUMA,‡ 12th IFToMM word‡ Congress, 2007.
- [17] J. Meneses, H. Rubio, C. Castejón, E. Ottaviano, and M. Ceccarelli, —Modelo cinemático del robot bípedo _Pasibot‘,‡ IX Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica., Las Palmas de Gran Canaria. España: 2009, p. 8.
- [18] H. Rubio, J. Meneses, C. Castejon, A. Jardon, A. Giménez, and J.C. García-prada, —Mechanical Desing of walking robot Pasibot. Parametric model and gait analysis.,‡ 12th International Conference on climbing and walking robots. CLAWAR 2009, Istambul. Turkey: 2009, pp. 1-9.
- [19] M.E. Escobar., H. Rubio., J.C. García-Prada., and M. Ceccarelli., —Sistema de Estabilización del Robot Pasibot.,‡ XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Ciudad Real. España: 2010, p. 8.
- [20] Jiménez Crespo, José Manuel. —Análisis y simulación del robot bípedo Pasibot. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2011.

Direcciones WEB:

- [1] CICYT (Centro de Investigación Científica y Tecnológica)

<http://cicyt.spol.edu.ec>

- [2] Grupo de investigación MAQLAB, Universidad Carlos III de Madrid.

www.maqlab.uc3m.es

- [3] Manual de MSC.ADAMS.

http://www.kxcad.net/MSC_Software

- [4] Tutorial de MSC.ADAMS.

<http://www.desing.uwaterloo.ca>



[5] Guía MSC.ADAMS.

<http://www.mscsoftware.com>

[6] Wikipedia.

<http://es.wikipedia.org>

[7] Tutorial Working Models 2D.

<http://www.desing-simulation.com>

[8] Robots Bípedos.

<http://www.jvmbots.com>

[9] Historia de los Robots.

<http://www.monografias.com>

[10] Facultad de ingeniería, UASLP.

<http://www.ingenieria.uaslp.mx>

[11] Software informático ADDLINK.

<http://www.addlink.es>

[12] Robot Seguritron

http://www.seguritron.com/los_20_mas.htm



Capítulo 9:

Presupuesto



PRESUPUESTO

A continuación se expone un desglose de las actividades, equipos y personal que han sido utilizadas o han colaborado en la realización de este proyecto, con objeto de ofrecer un presupuesto que pueda servir como indicador del coste del proyecto. El desglose de costes se ha dividido en tres grupos:

- **Licencias de software:** MSC Adams y Microsoft Office 2010. Estas licencias se comprarán estimando una amortización para cada uno de ellos de 1/10 para el caso de MSC Adams R3 y 1/10 para el caso del Microsoft Office 2010; además de Adobe Acrobat X Pro.
- **Personal:** Estimación del coste de todo el personal que ha colaborado en el proyecto. En este caso, como Ingeniero Sénior, el tutor del proyecto, Higinio Rubio Alonso y como Ingeniero Junior, los autores del proyecto, Juan José Tirado Ruiz y Germán García Marcos.
- **Resto de costes directos:** Se establece en este apartado los costes generales que faltan por detallar, tales como dietas, viajes, materiales fungibles, coste de impresión...

Una vez desglosado los elementos necesarios se presenta un presupuesto detallado con información económica de cada elemento así como el presupuesto global para este Proyecto Fin de Carrera.

PRESUPUESTO PROYECTO

Licencias de Software:

• <i>MSC Adams</i> (amortización 1/10)	6.000 €
• <i>Microsoft Office 2010</i> (amortización 1/10)	150 €
• <i>Adobe Acrobat X Pro</i>	400 €

Gastos informáticos, papelería y fungibles:

• Equipo informático (amortización 1/4)	450 €
• Gastos de impresión	
• Tóner y papel	450 €
• Impresión memoria	360 €

Mano de obra:

• Ingeniería y redacción de la memoria	
• Ingeniería (75 €/hora x 240 horas)	18.000 €
• Documentación y redacción (30 €/hora x 240 horas)	7.200 €
• TOTAL	33.010 €

El presupuesto total de este proyecto asciende a la cantidad de 33.010 euros.

Leganés a 25 de Julio de 2012

El/los ingeniero/s proyectista/s

Fdo.



Anexos

ANEXO I : Representación gráfica de las variables cinemáticas de un mecanismo ante variaciones dimensionales y espaciales de sus elementos

Introducción

En este trabajo, se procederá a realizar una representación gráfica de las variables cinemáticas de un mecanismo ante variaciones dimensionales y espaciales de sus eslabones. En este caso, el mecanismo a estudiar es el modelo simplificado de la pata del robot bípedo Pasibot, que aparece representado en la figura 1.



Figura 1.- Modelo Pasibot

El sistema mecánico del Pasibot se trata de un diseño sencillo y optimizado de un robot bípedo, contando éste únicamente con un grado de libertad.

El material de sus eslabones es Aluminio 2024-T351, aleación elegida por su buena maquinabilidad para uso mecánico, y por su uso en diversos estudios universitarios.

El diseño del Pasibot está basado en dos mecanismos: el Pantógrafo y el Chebyshev.

- **Mecanismo de Chebyshev o Hoekens**

Con el mecanismo de Chebyshev, se convierte el movimiento circular del motor en la entrada del mecanismo, en un movimiento de tramo casi rectilíneo y curvo en su salida.

Es un mecanismo simple, formado por tres eslabones: manivela motor, biela y balancín. La manivela transmite el movimiento de rotación a un movimiento compuesto en la biela. A continuación se muestra la representación de dicho mecanismo (figura 2):

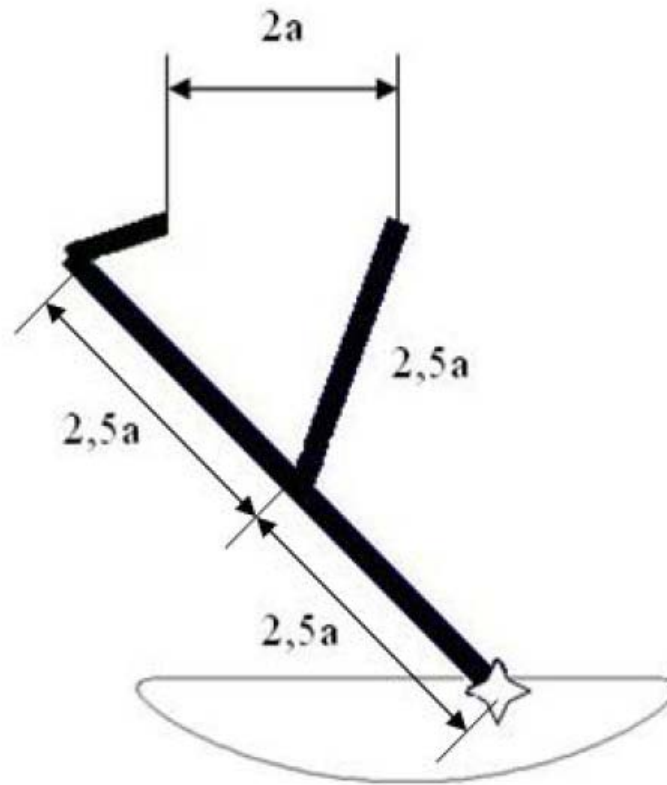


Figura 2.- Mecanismo de Chebyshev o Hoekens

Éste es el mecanismo principal para que el robot funcione correctamente, debido a que es a partir del mismo donde se empieza a transmitir el movimiento. Con la relación de dimensiones mostradas en la figura anterior, se aprecia cómo el movimiento que le transmite el motor a la manivela es un movimiento de salida de la biela formado por un tramo aproximadamente rectilíneo y otro curvo. El movimiento recto corresponde a cuando un pie del robot está totalmente apoyado en el suelo mientras que el otro pie está realizando la trayectoria curva que lo desplaza hacia adelante, intercambiándose posteriormente las funciones una vez que dicho pie apoya en el suelo.

- **Mecanismo de Pantógrafo**

El Pantógrafo es un mecanismo inventado con el fin de reproducir figuras a escala o incluso copiarlas. Se trata de un mecanismo de 5 eslabones y cadena abierta, con 2 grados de libertad. Para ello se varía la distancia entre los puntos de articulación de cada uno de los eslabones, conservando siempre la condición de paralelismo entre ellos dos a dos (figura 3).

Los eslabones que forman el Pantógrafo, se pueden asemejar a la pierna humana, dando así pues al fémur, la tibia y el peroné. Todos ellos están conectados entre si de tal forma que se pueden mover respecto del punto fijo (pivote que une el Chebyshev con el Pantógrafo).

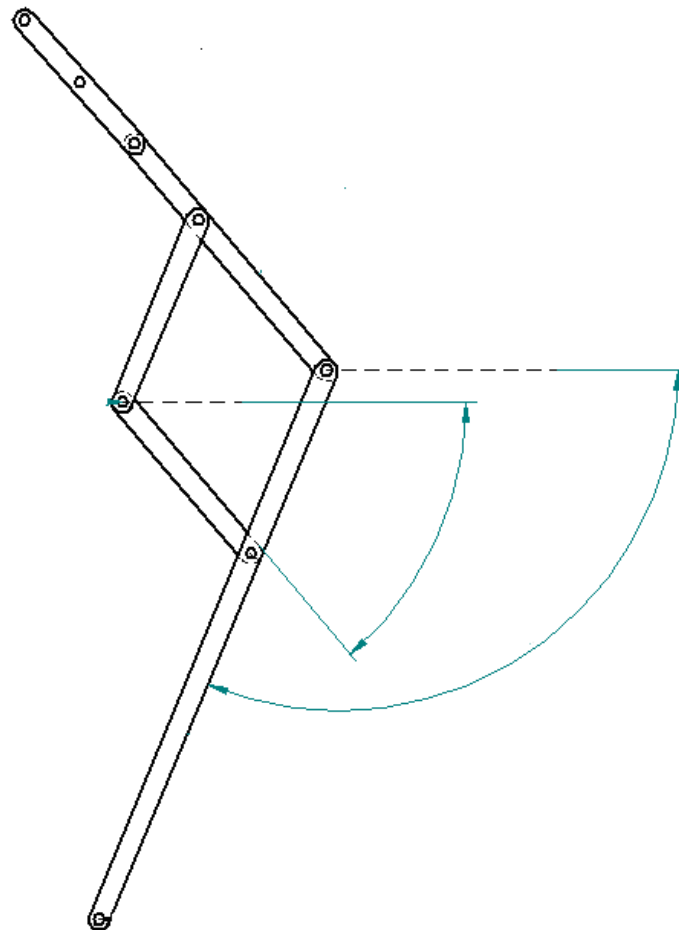


Figura 3.-Mecanismo de Pantógrafo

Más concretamente, para el modelo simplificado correspondiente a al pata del Pasibot, se consigue aumentar e invertir el movimiento generado por el mecanismo de Chebyshev (figura 4).

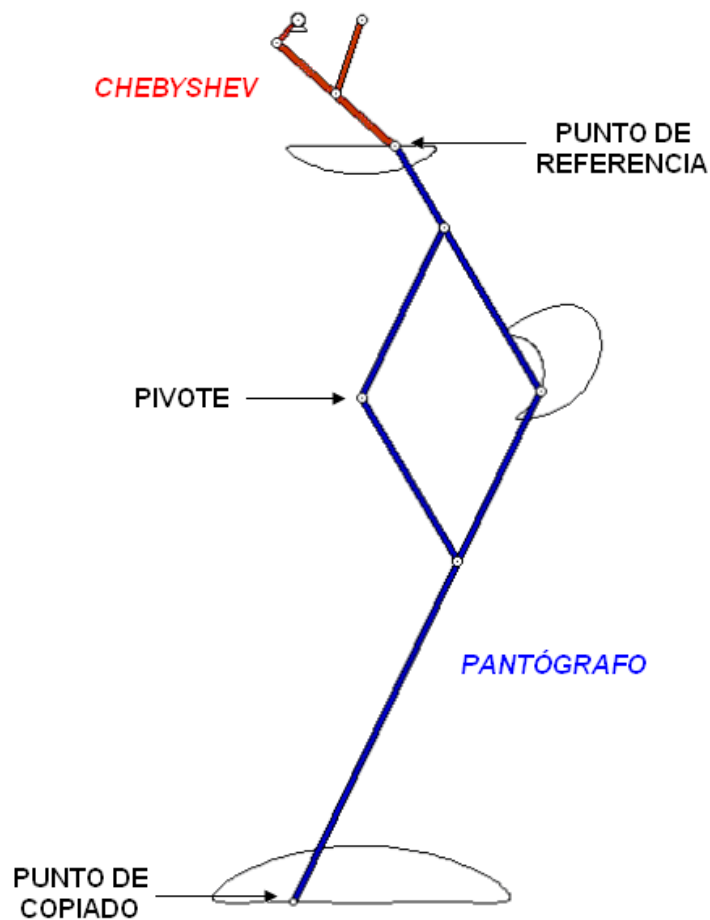


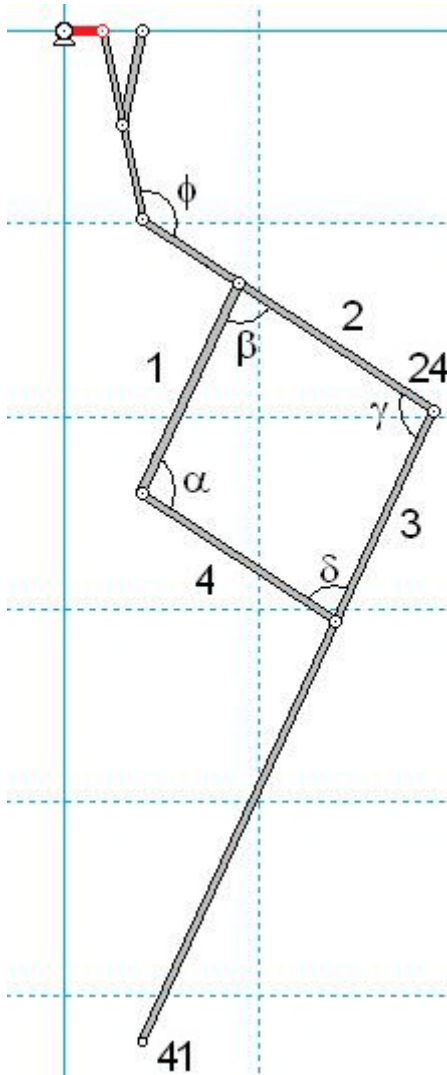
Figura 4.-Trayectorias de Chebyshev y Pantógrafo

Para la consecución de este trabajo, se parte de un estudio realizado anteriormente. Dicho estudio, consistía en una verificación de las trayectorias de varios puntos del mecanismo (Pasibot) en función de las longitudes de algunas de las barras y de la posición de uno de los apoyos. Para ello, se utilizó el programa Working Model. Dicho programa, es una herramienta de CAE que permite crear simulaciones de sistemas mecánicos reales que permiten reducir el tiempo de creación de un producto, mejorando la calidad final y optimizando los cálculos. Se trata de una herramienta muy útil para los ingenieros para crear y analizar los sistemas mecánicos reales.

Así pues, a partir de los datos generados por el programa Working Model, se ha procedido a su respectiva representación gráfica mediante el programa de hojas de cálculo Excel. Es aquí, ante la representación gráfica, donde podemos apreciar cómo se comporta el mecanismo ante la diversidad de variaciones aplicadas. Se quiere comentar de una forma clara y precisa las variaciones producidas en cada una de las gráficas, resaltando y haciendo hincapié en las más notorias y significativas.

Por así decirlo, se obtiene un análisis cinemático correspondiente a la rodilla (punto 24) y al pie o tobillo (punto 41).

En la siguiente figura (figura 5), quedan perfectamente identificadas las barras (1,2, 3 y 4), los puntos a estudiar correspondientes a las rodilla (24) y al pie o tobillo (41), y la manivela (representada en color rojo).



Los parámetros de partida para la realización de este trabajo son:

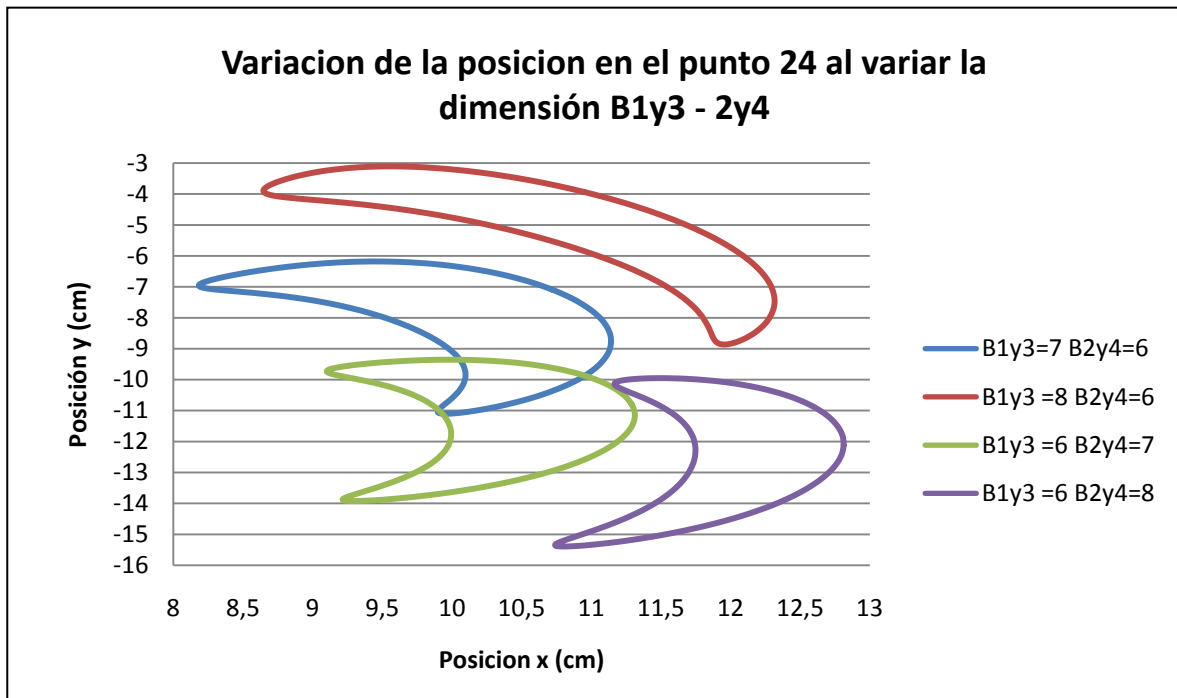
- Se trabaja con el modelo simplificado del Pasibot, concretamente con su pata.
- El mecanismo representado está a escala 1:3 del Pasibot original
- Los datos de partida han sido generados por un estudio anterior con el programa de CAE Working Model.
- El tiempo de estudio estaba prefijado en 18 segundos, que es el ciclo completo de la manivela (representada en la siguiente figura en color rojo).
- El sentido de giro de la manivela es horario.

Figura 5.-Representación del mecanismo

El estudio en sí, consiste en:

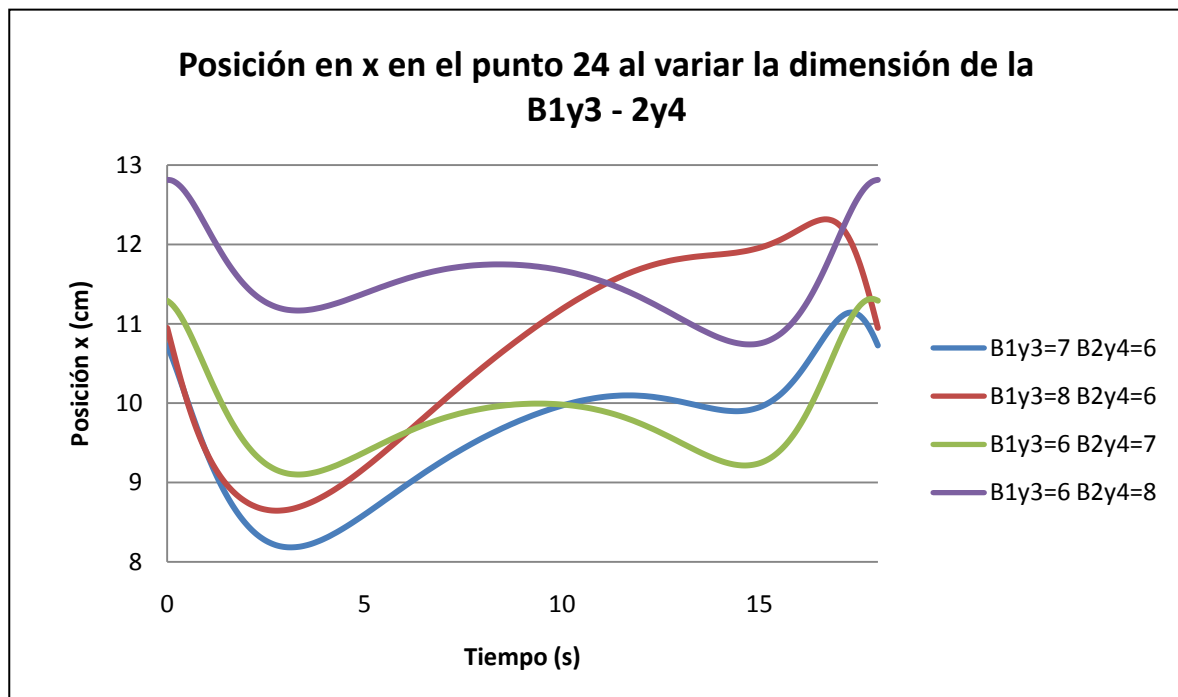
- La representación de las variaciones cinemáticas producidas en los puntos 24 (rodilla) y 41 (tobillo o pie).
- Las variaciones realizadas se pueden dividir en dos apartados:
 - Variaciones dimensionales de las barras 1y3-2y4.
 - $B1y3=7$ - $B2y4=6$ (cm)
 - $B1y3=8$ - $B2y4=6$ (cm)
 - $B1y3=6$ - $B2y4=7$ (cm)
 - $B1y3=6$ - $B2y4=8$ (cm)
 - Variaciones dimensionales del punto fijo (las coordenadas aparecen en cm).
 - (1,-12)
 - (1.5,-12)
 - Posición inicial (2,-12)
 - (2.5,-12)
 - (3,-12)
 - (2,-11.5)
 - (2,-11)
 - (2,-10.5)
 - (2,-10)
 - (2,-9.5)
 - (2,-9)
 - (2,-8.5)
 - (2,-8)
- Para cada variación realizada ha sido representada:
 - Posición en el eje y frente al eje x
 - Posición en el eje x frente al tiempo
 - Posición en el eje y frente al tiempo
 - Velocidad en el eje x frente al tiempo
 - Velocidad en el eje y frente al tiempo
 - Velocidad absoluta frente al tiempo
 - Aceleración en el eje x frente al tiempo
 - Aceleración en el eje y frente al tiempo
 - Aceleración absoluta frente al t

BARRAS 1y3 2y4

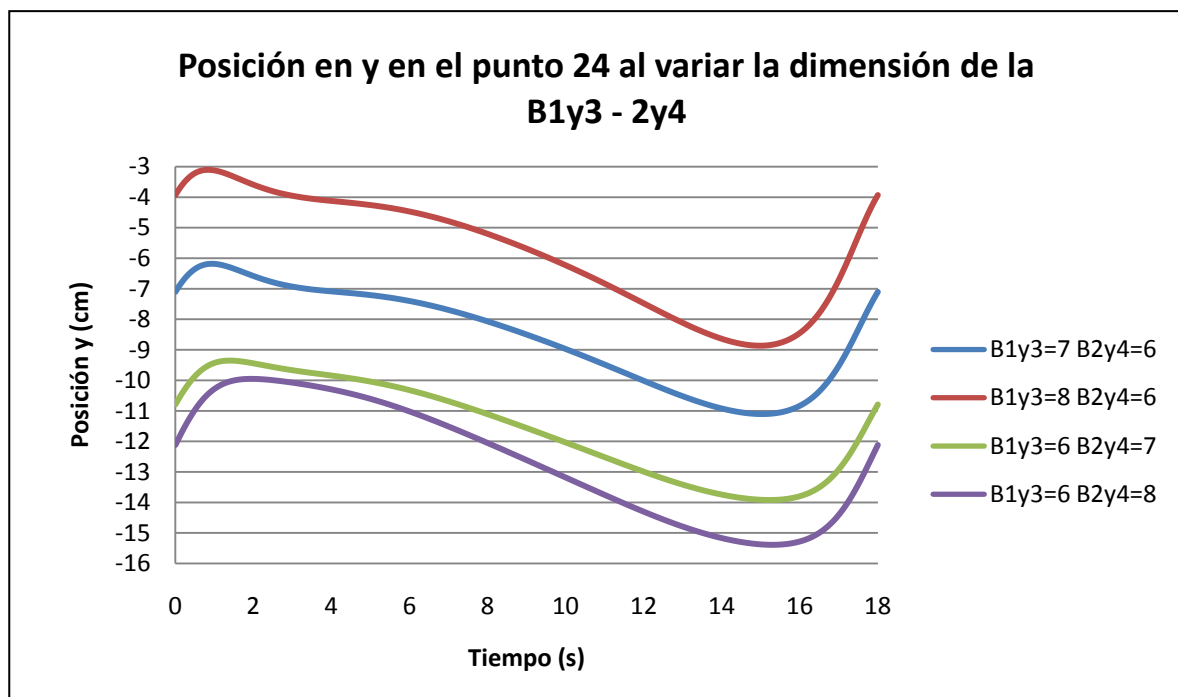


En esta gráfica queda reflejada la trayectoria que recorre dicho punto para cada una de las dimensiones de las barras. Podemos apreciar que los perfiles de las barras $B_{y3}=6$ $B_{2y4}=7$ y $B_{y3}=6$ $B_{2y4}=8$ son similares en cuanto a la trayectoria que siguen (no en cuanto a los ejes representados, si no en cuanto a la "forma"), guardando un menor parecido con el de la barra $B_{y3}=7$ $B_{2y4}=6$ y menos aún con el de la barra $B_{y3}=8$ $B_{2y4}=6$.

BARRAS 1y3 2y4



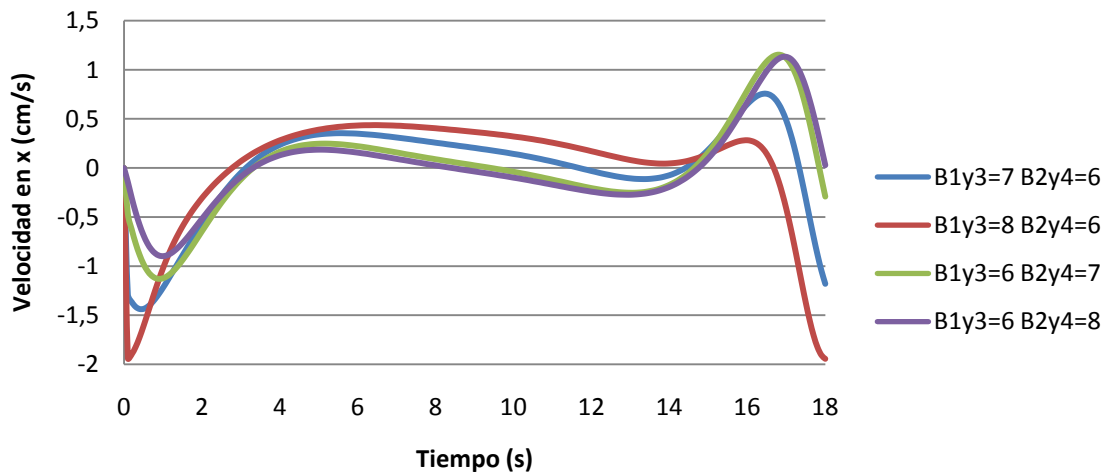
La posición en x tras el tiempo de estudio llega al mismo punto de partida. La evolución en el transcurso del tiempo no sigue un patrón claro.



Por otro lado, la posición en y, se aprecia cómo dependiendo qué dimensiones se varíen, se obtiene una mayor o menor posición en el transcurso del tiempo.

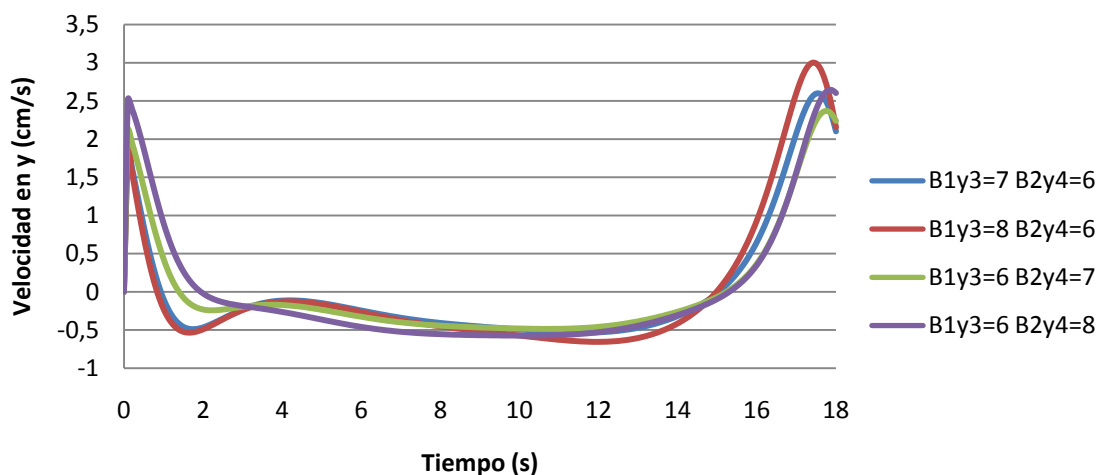
BARRAS 1y3 2y4

Velocidad en x en el punto 24 al variar la dimensión de la B1y3 - 2y4



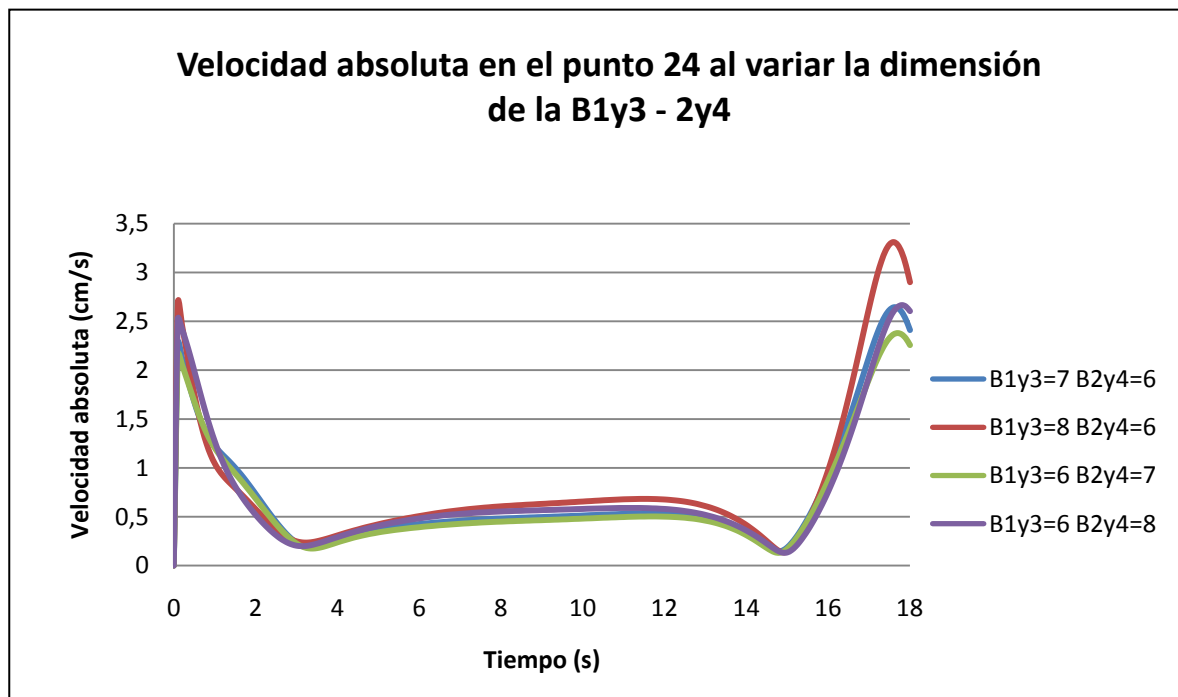
La velocidad en el eje de abscisas para las B1y3 de 6 cm es prácticamente la misma salvo en el intervalo [0,2]. En el instante de tiempo 15 segundos, la velocidad coincide independientemente del tamaño de las barras.

Velocidad en y en el punto 24 al variar la dimensión de la B1y3 - 2y4

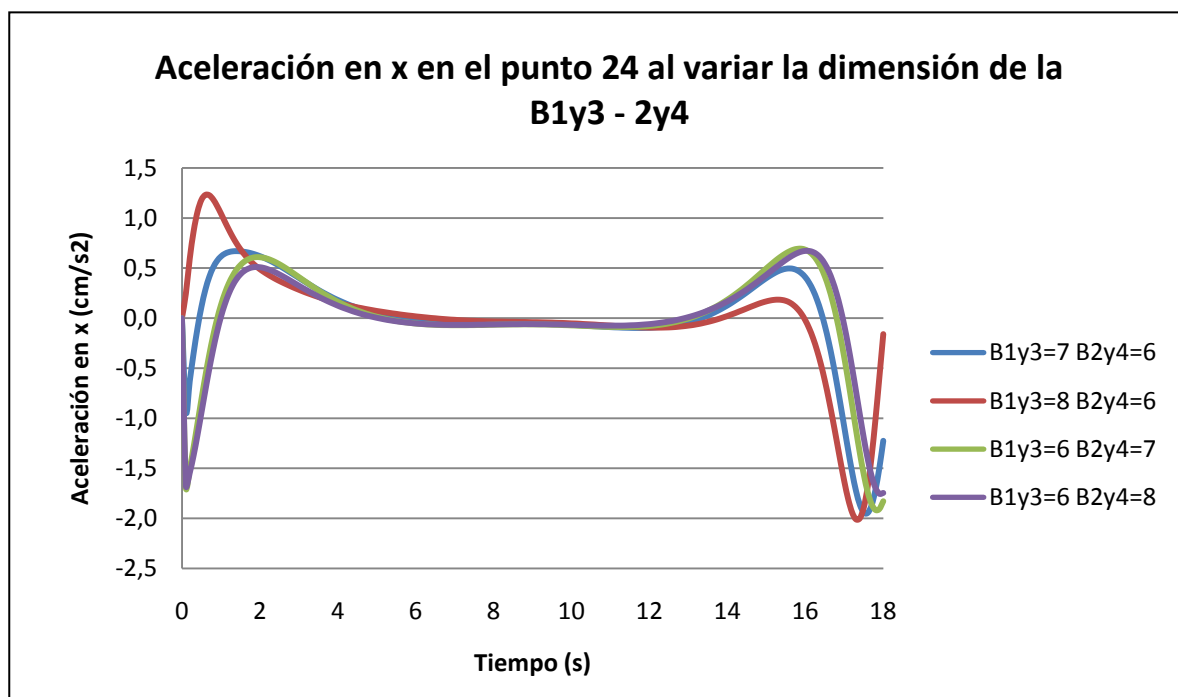


La velocidad en el eje de ordenadas para las B2y 4 de 6 cm es prácticamente la misma en todo el tiempo de estudio. En los instantes de tiempo de 3 y 15 segundos, las velocidades coinciden independientemente del tamaño de las barras.

BARRAS 1y3 2y4

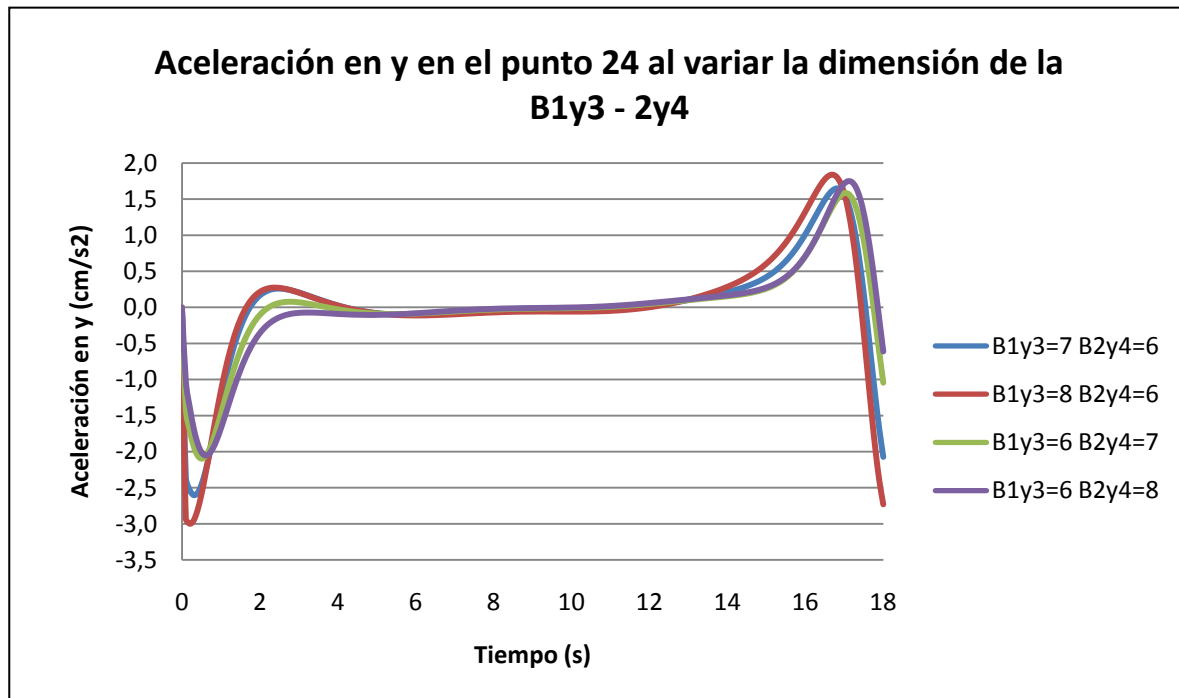


El perfil de velocidades obtenidas sufre variaciones mínimas hasta alcanzar un tiempo de 15 segundos. A partir de ahí, la barra B1y3=8 B2y4=6 muestra una mayor pendiente que el resto, llegando incluso a un máximo de 1cm/s^2 por encima de la menor.

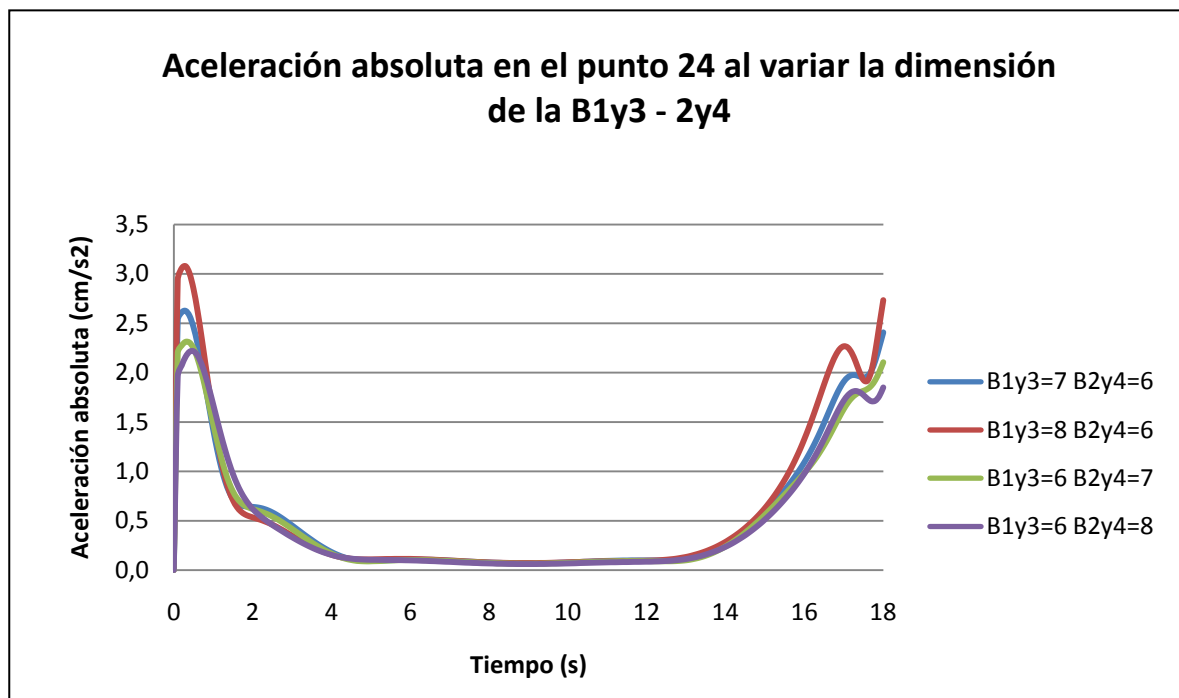


La aceleración en x provocada por las barras con B1y3=6 es prácticamente igual a lo largo del tiempo estudiado, mientras que para las otras dos sufren variaciones significantes, especialmente para B1y3=8 B2y4=6 llegando a un máximo en un tiempo de 1 segundo.

BARRAS 1y3 2y4

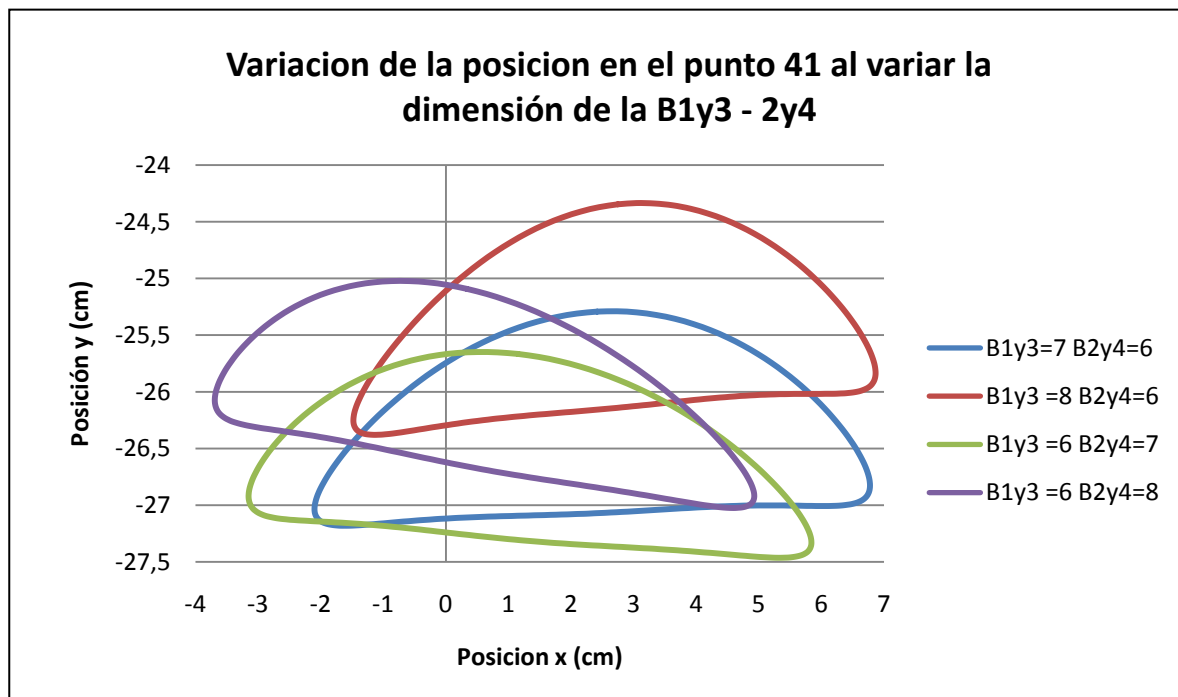


Aceleraciones similares en el intervalo de tiempo [5,13] segundos para todas las barras. Las barras B1y3=7 B2y4=6 y B1y3=8 B2y4=6 presentan mayor simultaneidad entre ellas al igual que las barras B1y3=6 B2y4=7 y B1y3=6 B2y4=8.



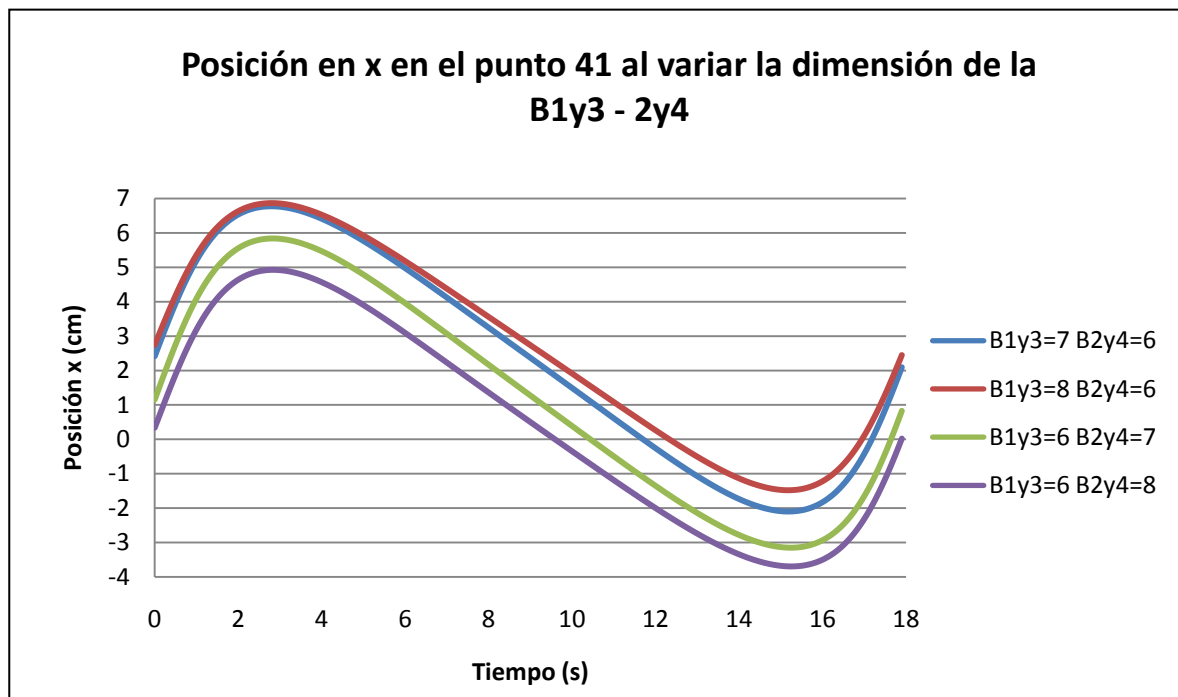
Aceleraciones absolutas similares en el intervalo de tiempo [5,13] segundos para todas las barras. Las barras B1y3=6 B2y4=7 y B1y3=6 B2y4=8 presentan un comportamiento similar en todo el tiempo. Vemos cómo a mayor dimensión de B1y3, mayor aceleración absoluta.

BARRAS 1y3 2y4

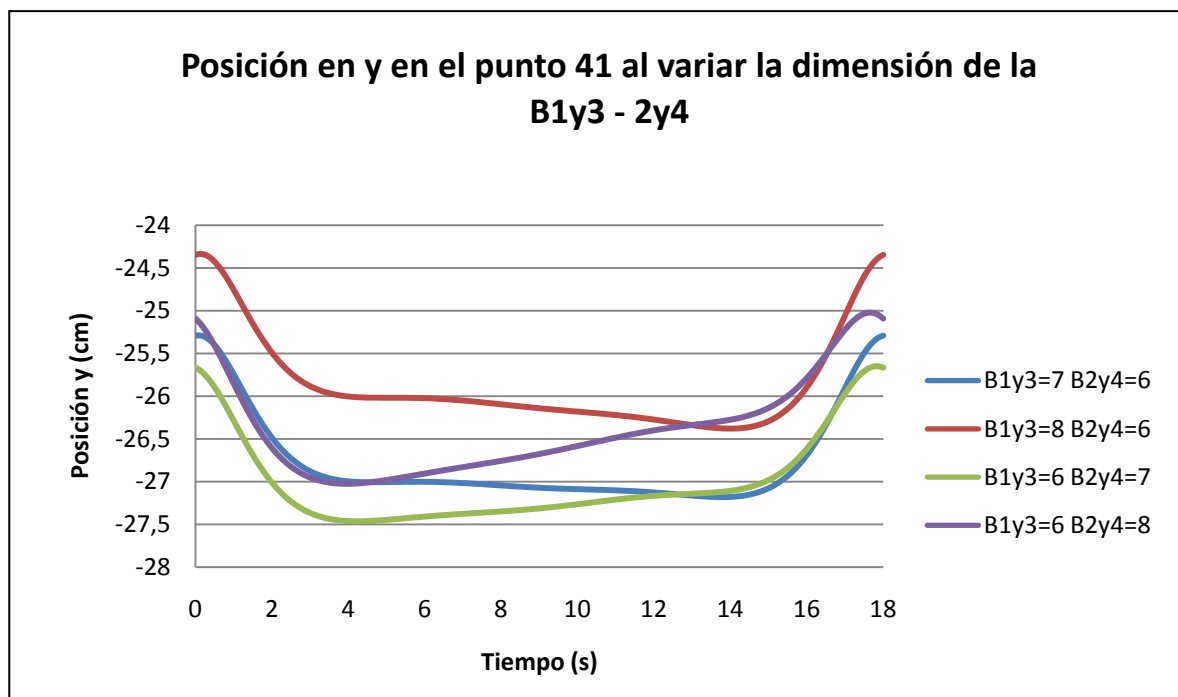


En esta gráfica queda reflejada la trayectoria que recorre dicho punto para cada una de las dimensiones de las barras. La trayectoria para las distintas barras es similar, no así como las posiciones en cuanto a los ejes representados.

BARRAS 1y3 2y4

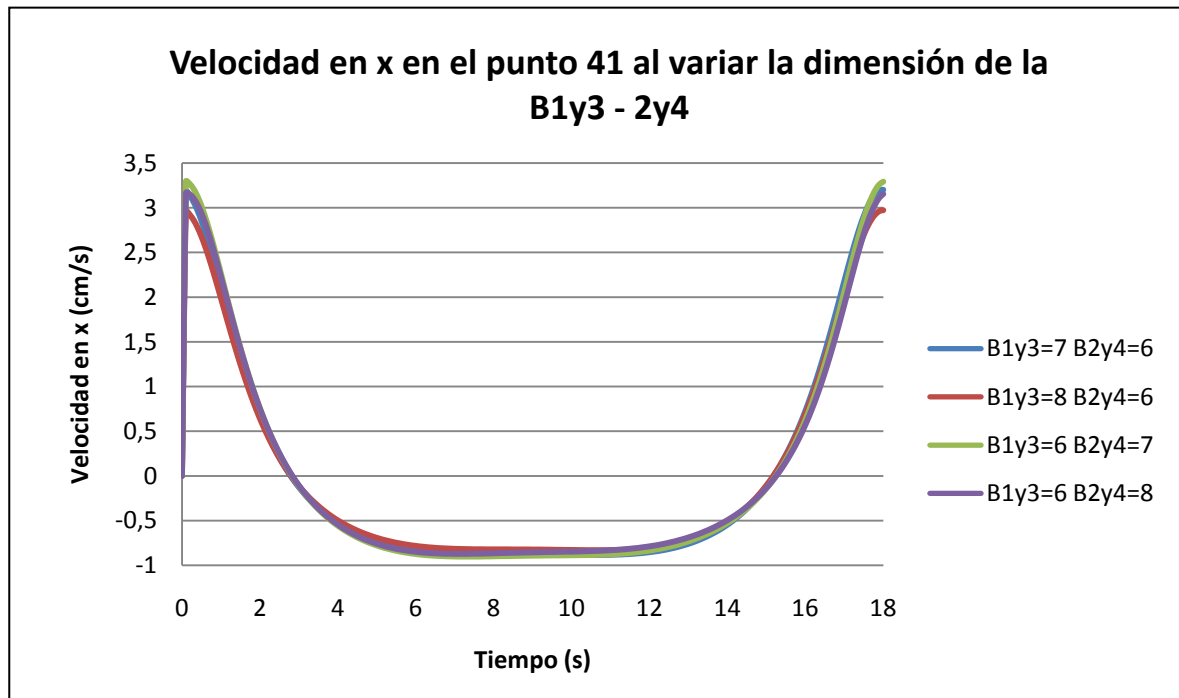


A mayor dimensión de B1y3 mayor posición en el eje de abscisas, y en caso de que esta sea igual, a menor dimensión de B2y4, mayor posición en el eje de abscisas.

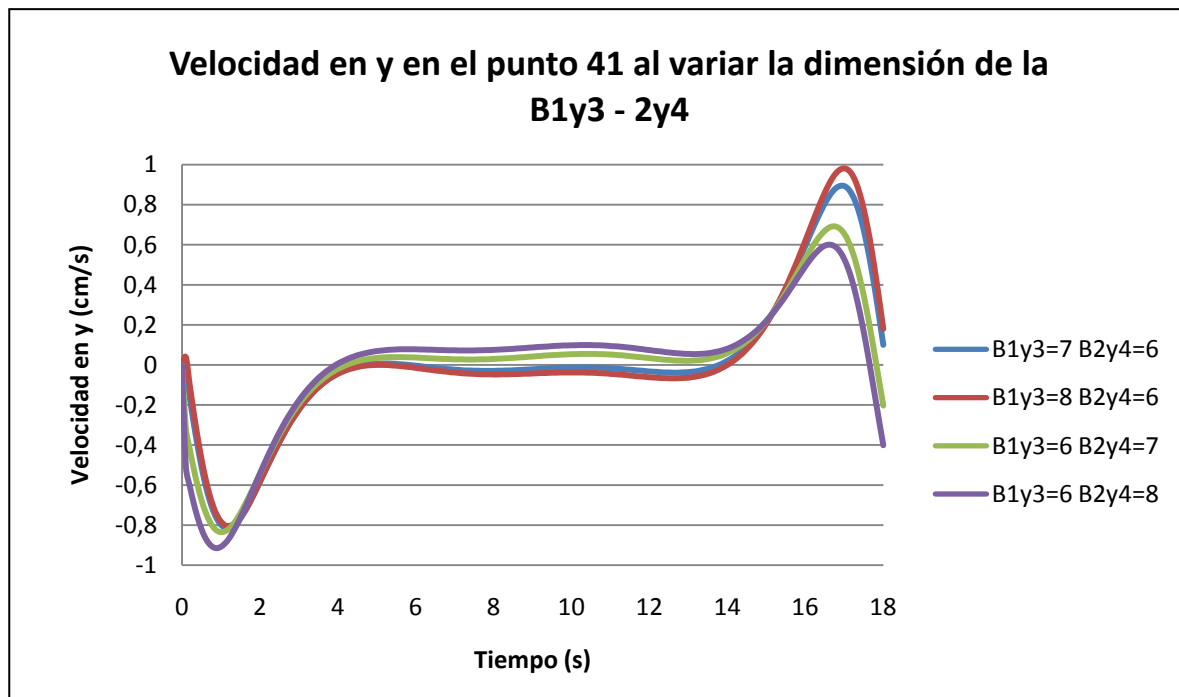


Posicionamiento en el eje de ordenadas dispar. Por un lado, las barras B1y3=7 B2y4=6 y B1y3=8 B2y4=6 siguen una trayectoria similar, mientras que por otro lado lo hacen las barras B1y3=6 B2y4=7 y B1y3=6 B2y4=8.

BARRAS 1y3 2y4

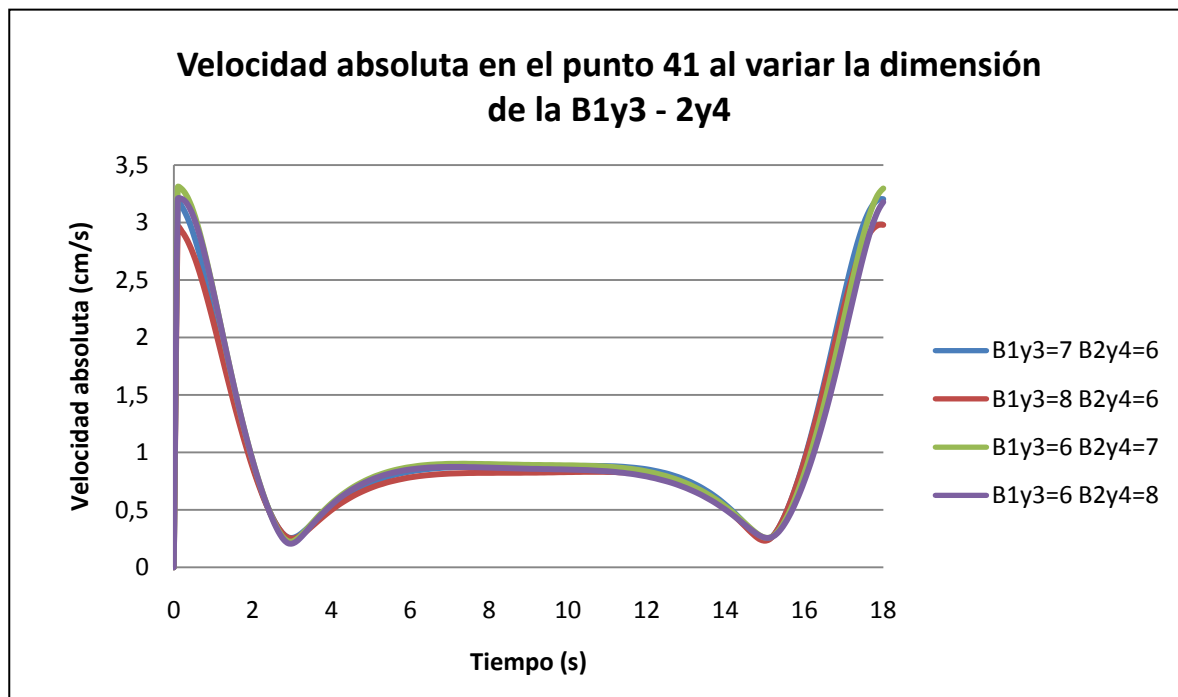


Velocidades en el eje de abscisas muy similares para todo el tiempo estudiado para las distintas dimensiones de las barras

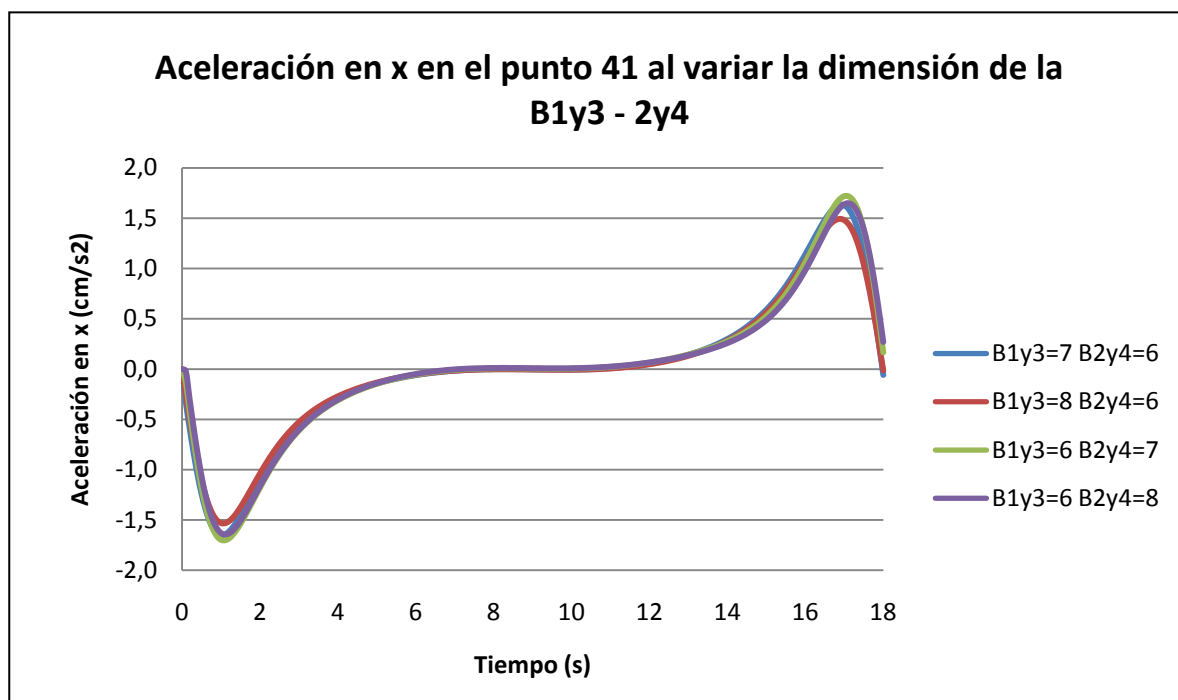


Perfil similar en cuanto a las trayectorias en el eje de ordenadas, donde por un lado las barras B1y3=7 B2y4=6 y B1y3=8 B2y4=6 siguen una trayectoria similar, mientras que por otro lado lo hacen las barras B1y3=6 B2y4=7 y B1y3=6 B2y4=8.

BARRAS 1y3 2y4

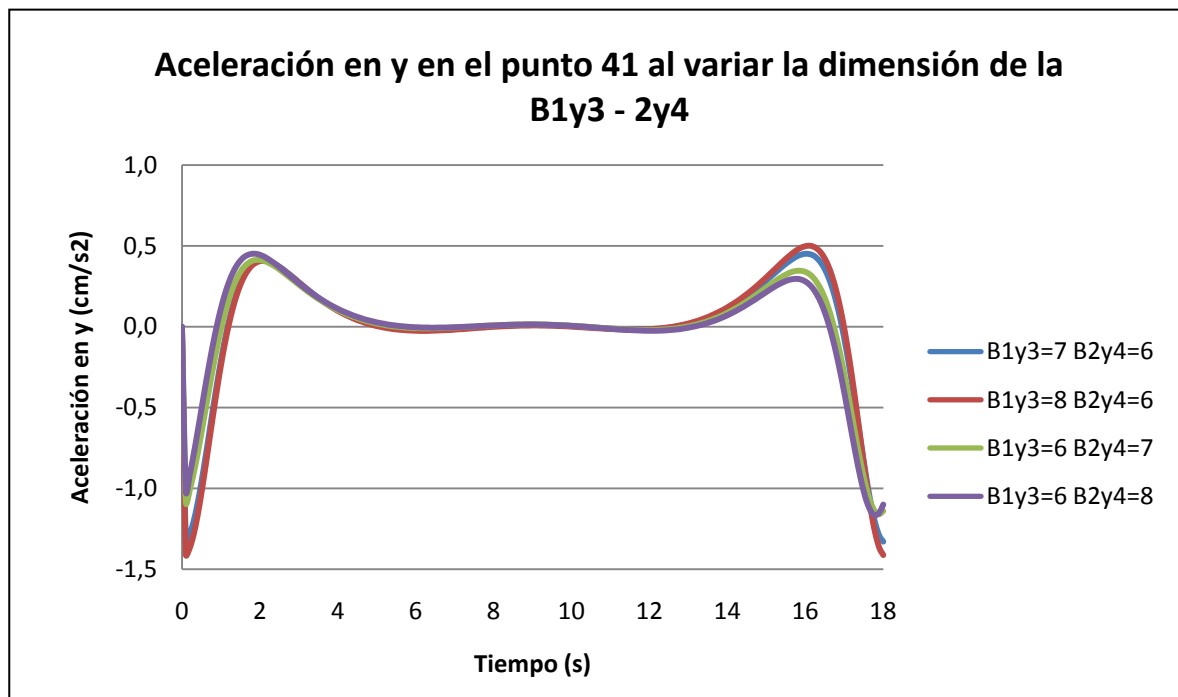


Velocidad absoluta muy similar para todo el tiempo estudiado para las distintas dimensiones de las barras. Se aprecia cierta simetría en torno al eje de ordenadas con un tiempo de 9 segundos.

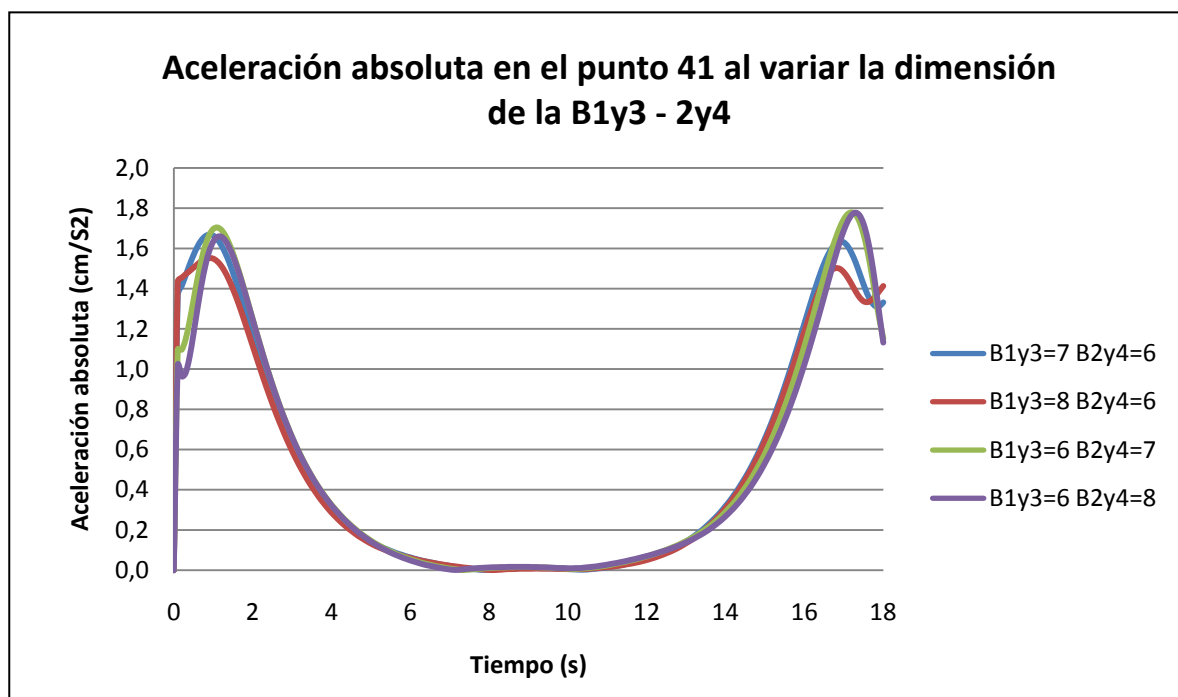


Aceleración en el eje de abscisas muy similar para todo el tiempo estudiado para las distintas dimensiones de las barras

BARRAS 1y3 2y4

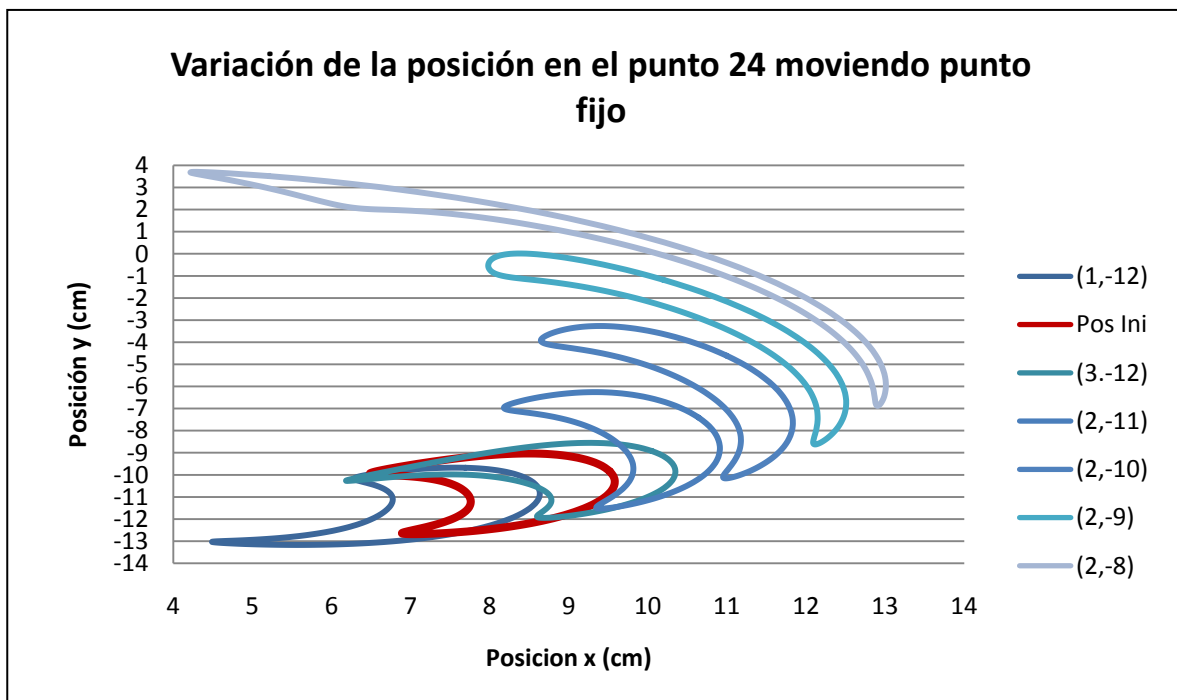
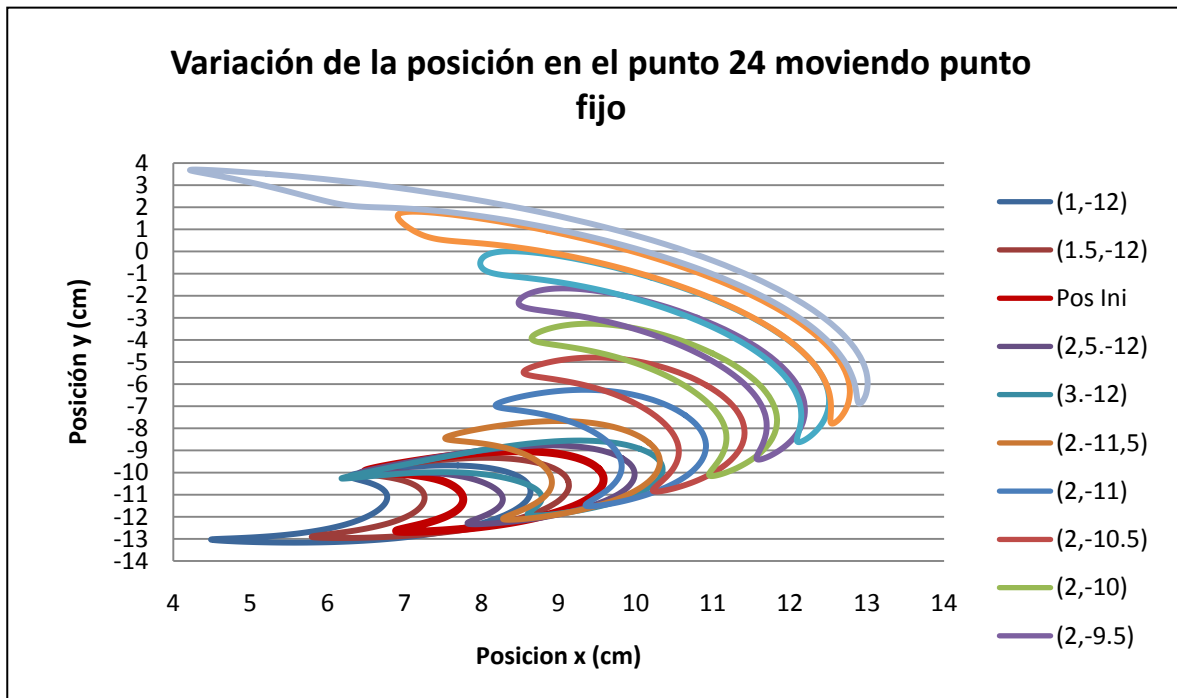


Perfil en el que las trayectorias de las barras B1y3=7 B2y4=6 y B1y3=8 B2y4=6 siguen una trayectoria similar, mientras que por otro lado lo hacen las barras B1y3=6 B2y4=7 y B1y3=6 B2y4=8.



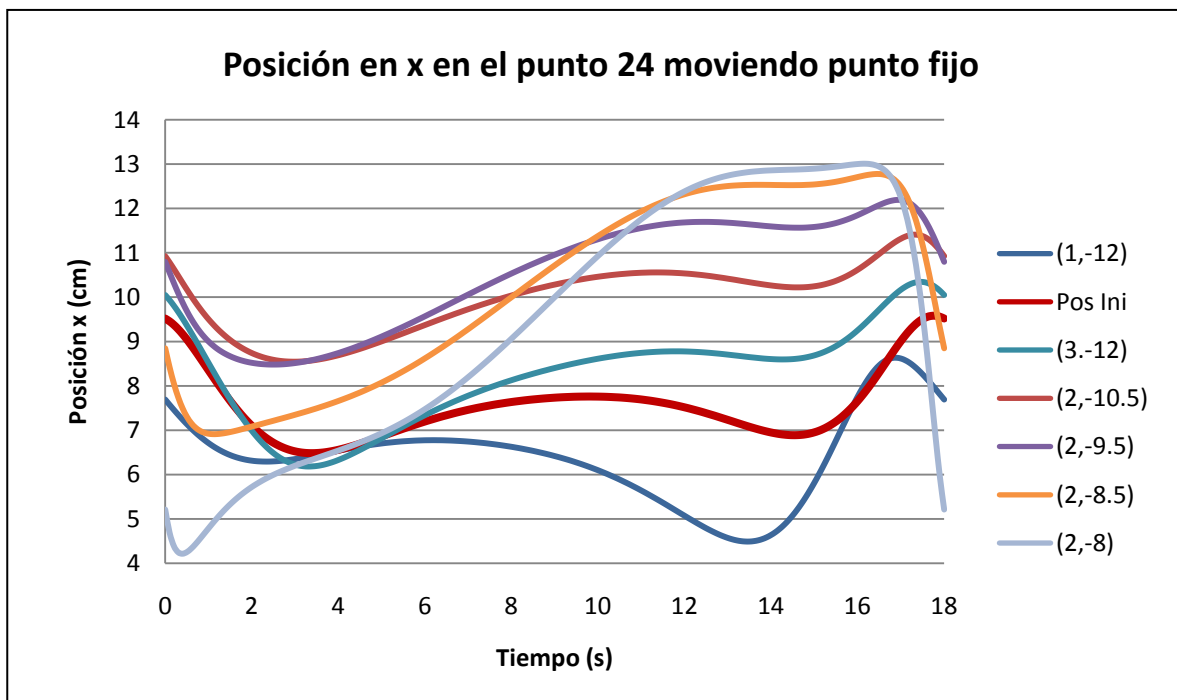
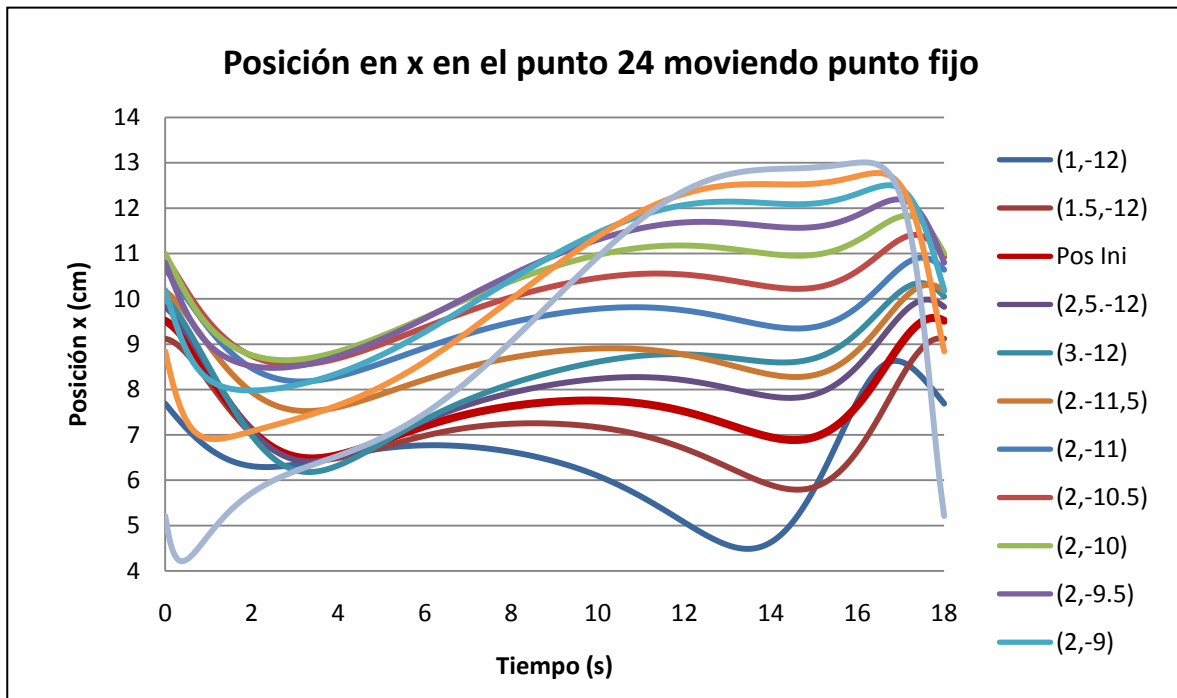
Aceleración absoluta prácticamente idéntica para las barras B1y3=6 B2y4=7 y B1y3=6 B2y4=8. En el intervalo de tiempo [5,13] segundos las aceleraciones coinciden para las distintas dimensiones de las barras.

PUNTO FIJO



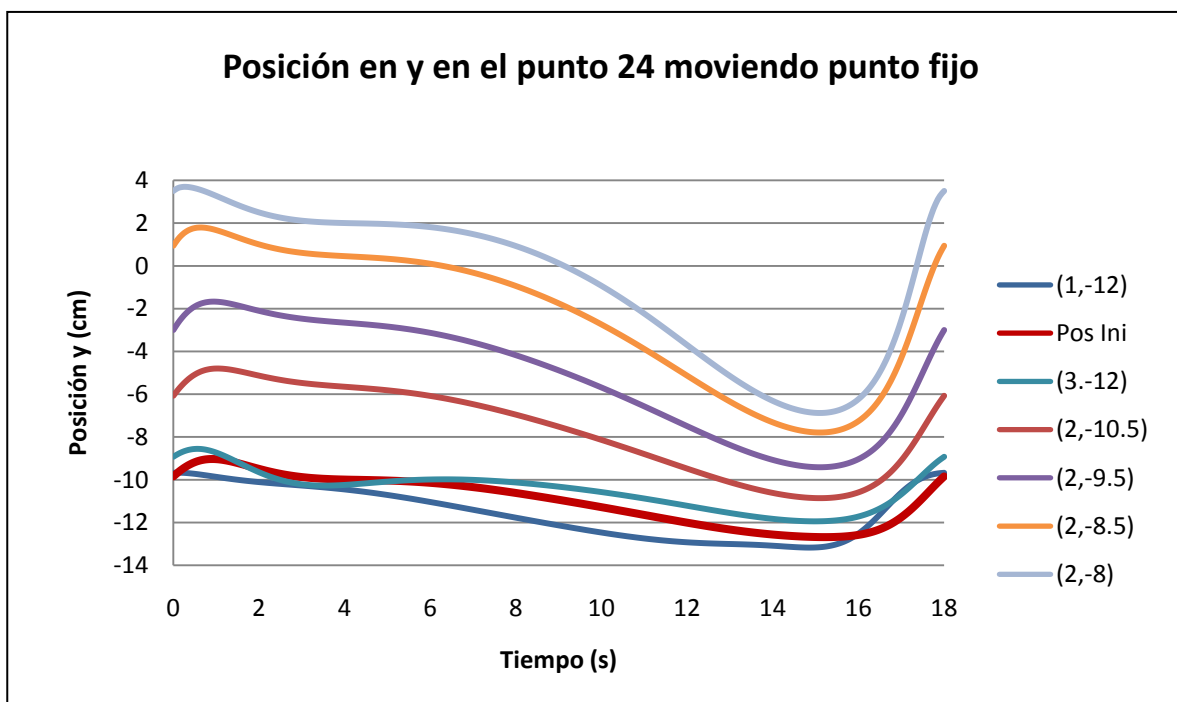
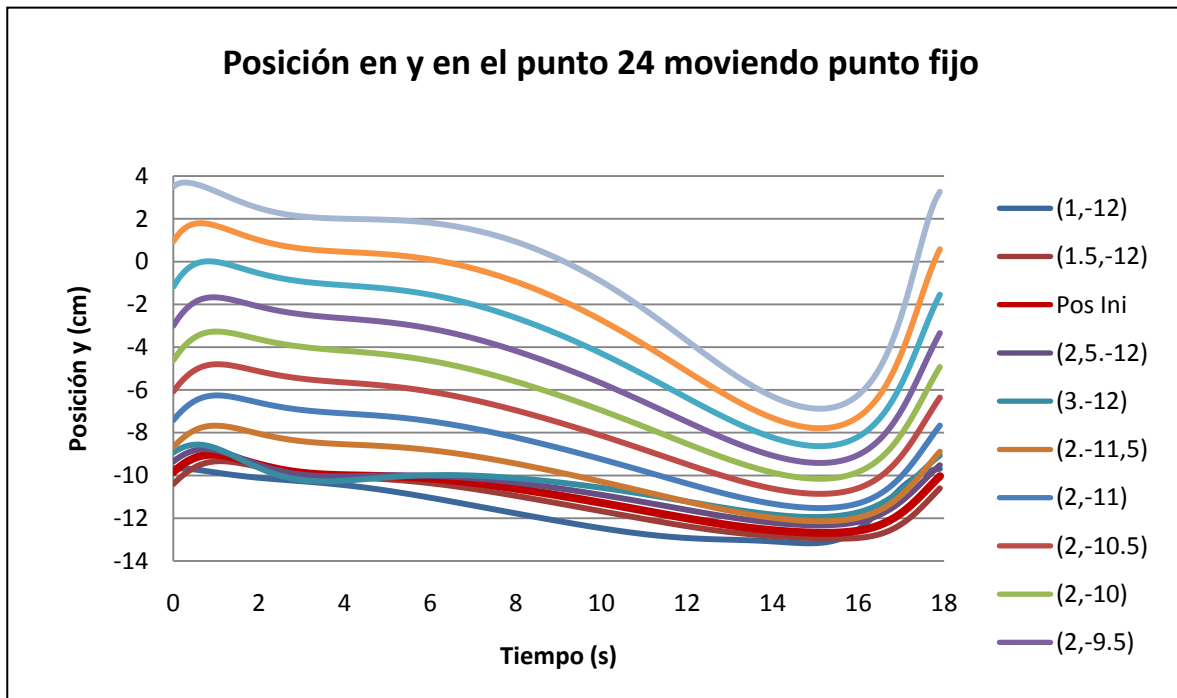
En esta gráfica queda reflejada la trayectoria que recorre dicho punto para cada una de las posiciones del punto fijo. Nótese que cuanto mayor es la variación del mismo en el eje de abscisas y en el eje de ordenadas (en valor absoluto), mayor es la distancia recorrida del perfil.

PUNTO FIJO



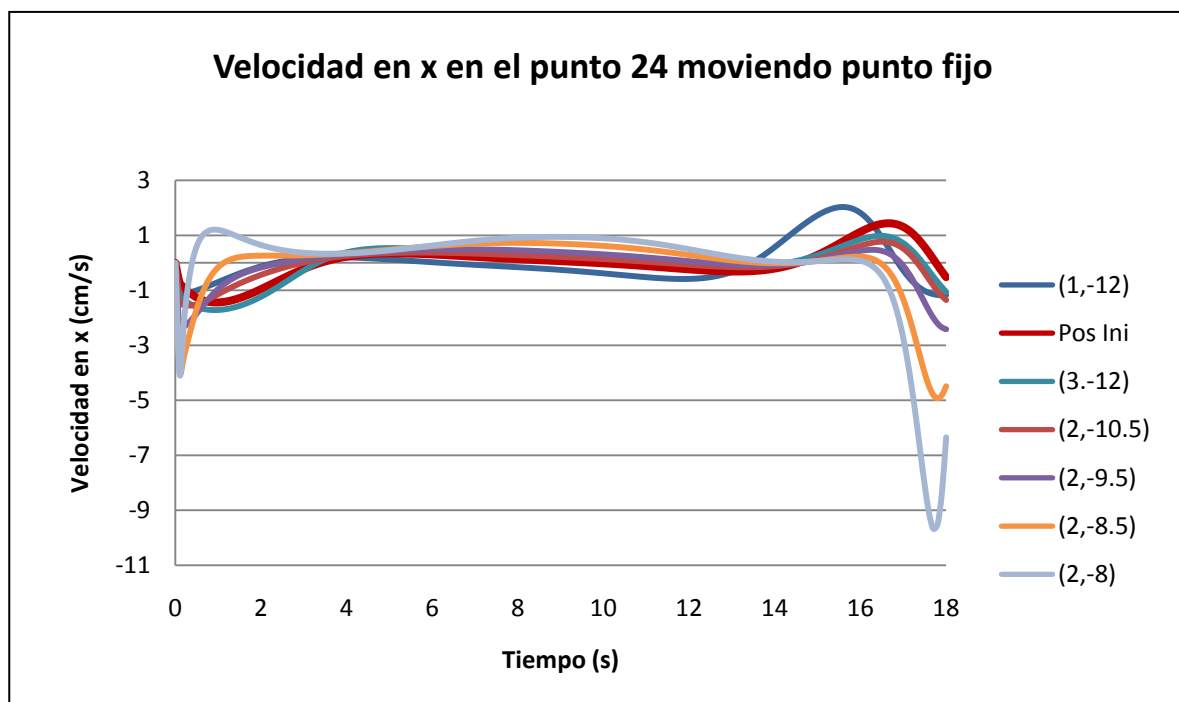
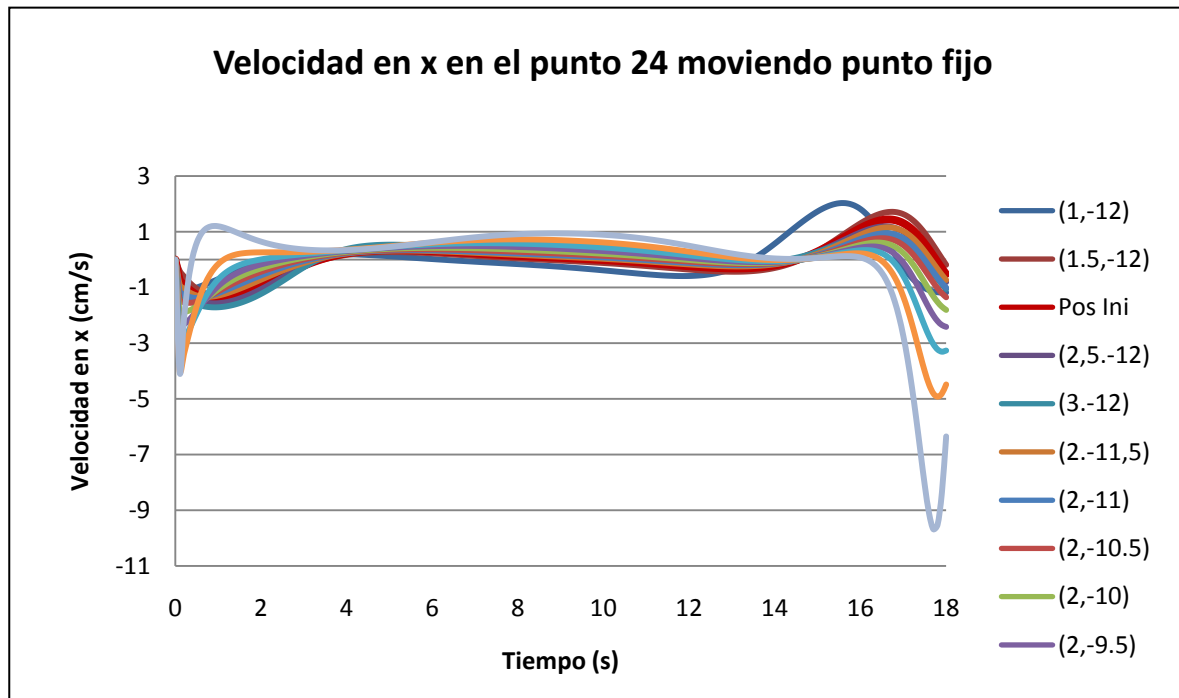
A mayor variación del punto fijo, se produce un posicionamiento mayor en el eje de abscisas, excepto para distancias mayores a (2,-10) donde esa tendencia no comienza desde el principio del tiempo del estudio, si no de forma progresiva.

PUNTO FIJO



La posición en el eje de ordenadas es mayor cuanto mayor es la variación del punto fijo. Para variaciones menores a (2,-11) la evolución de la posición no sigue la tendencia marcada por las distintas variaciones anteriores.

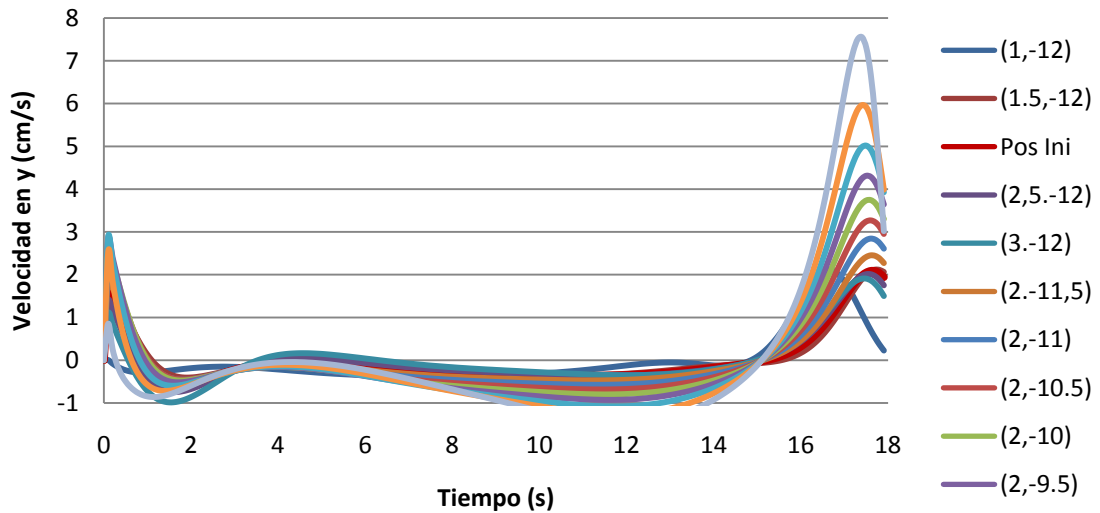
PUNTO FIJO



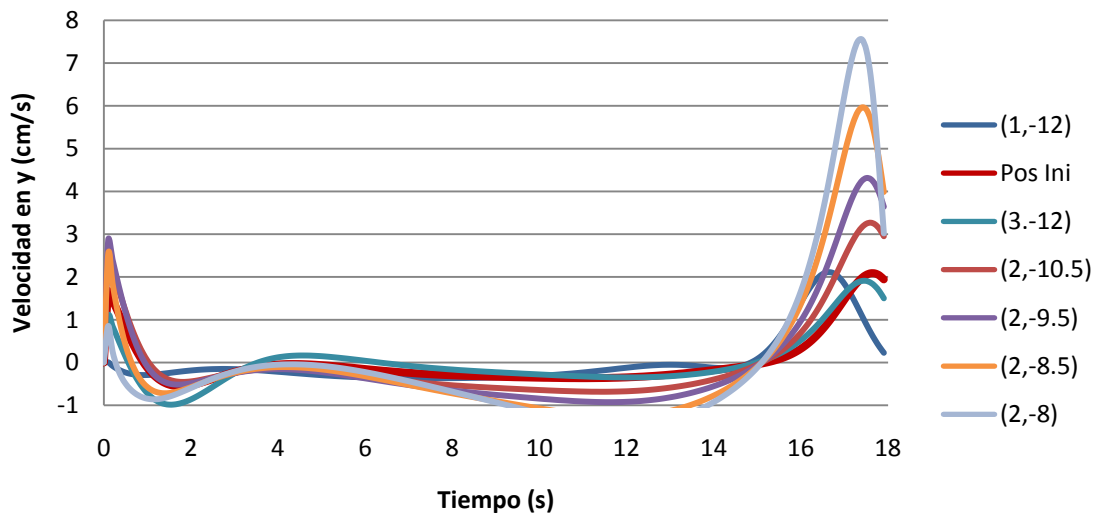
Cuanto más alejado esté el punto fijo, mayor es la diferencia de velocidades respecto al inicial. De hecho, para las distancias mayores a partir de (2,-9) la diferencia es bastante elevada. También se observa una diferencia notable para la posición del punto en (1,-12).

PUNTO FIJO

Velocidad en y en el punto 24 moviendo punto fijo

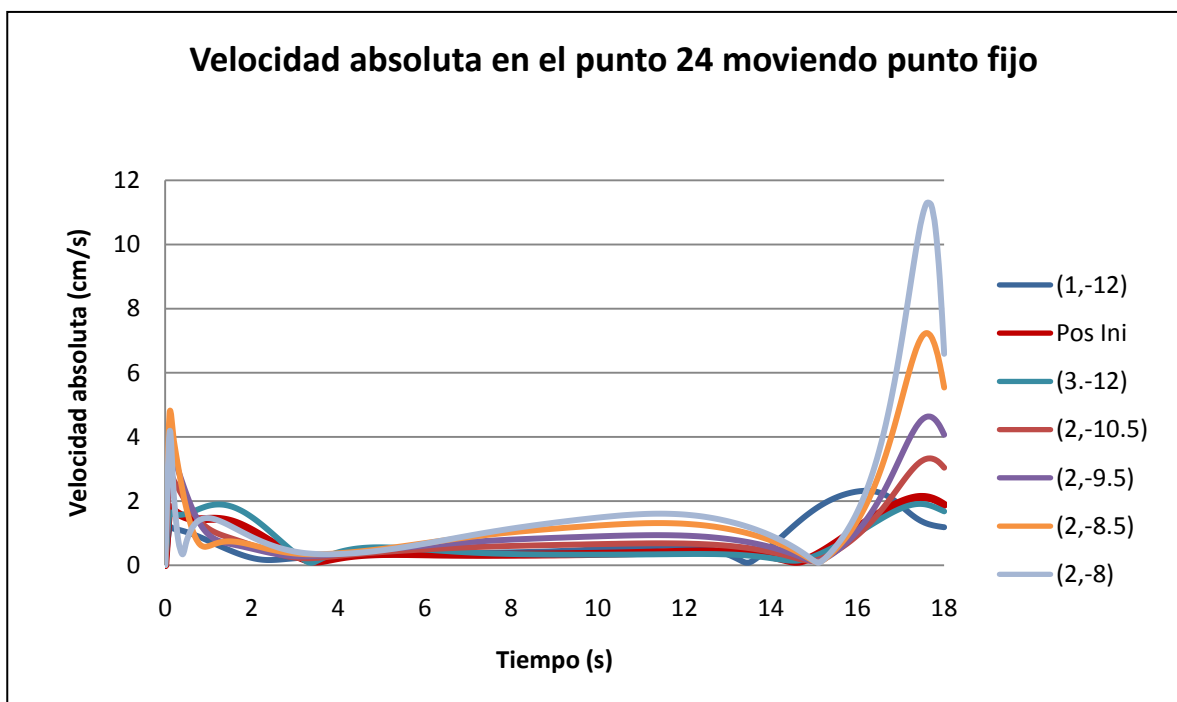
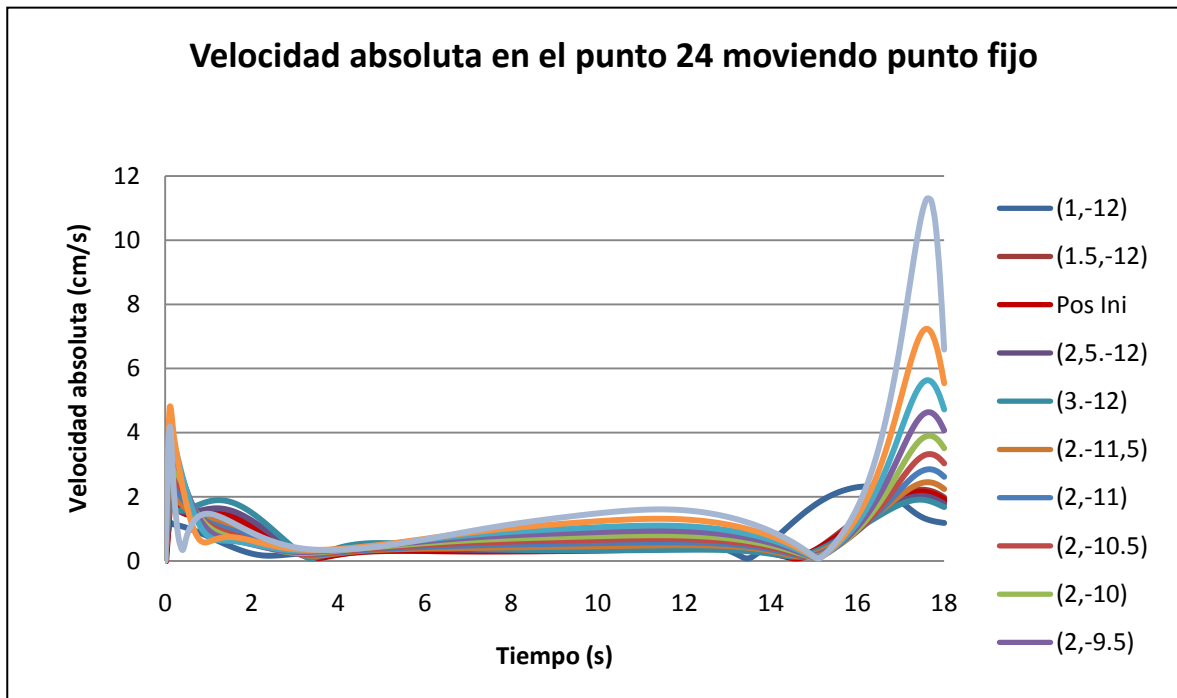


Velocidad en y en el punto 24 moviendo punto fijo



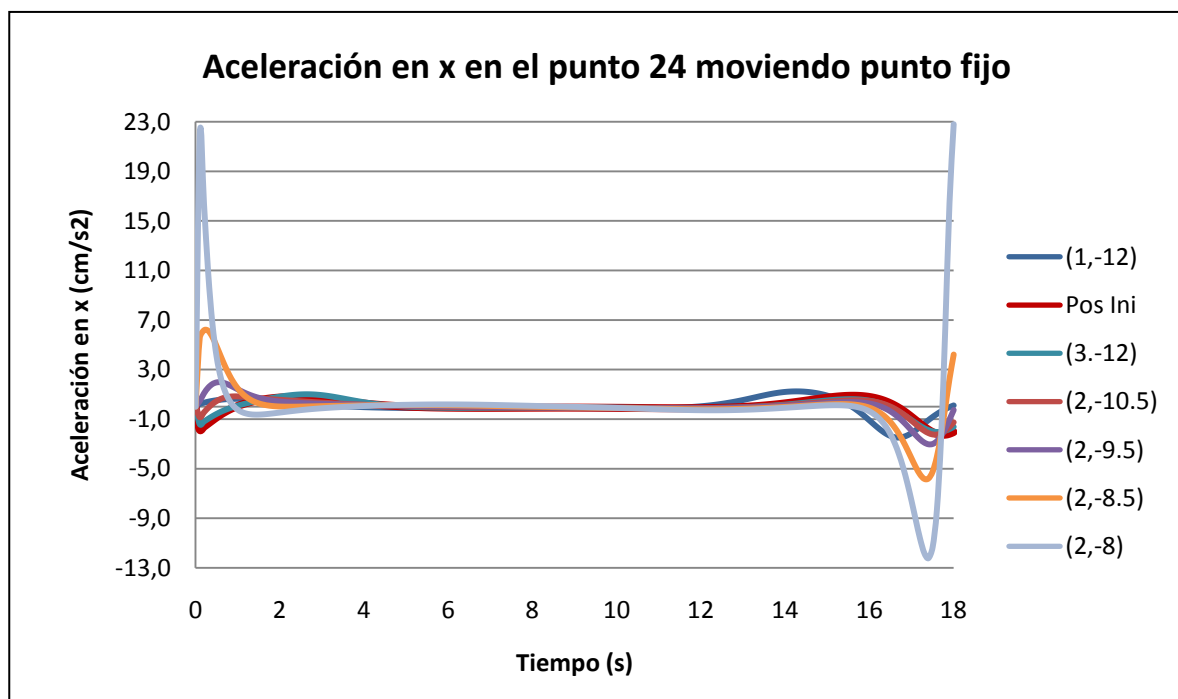
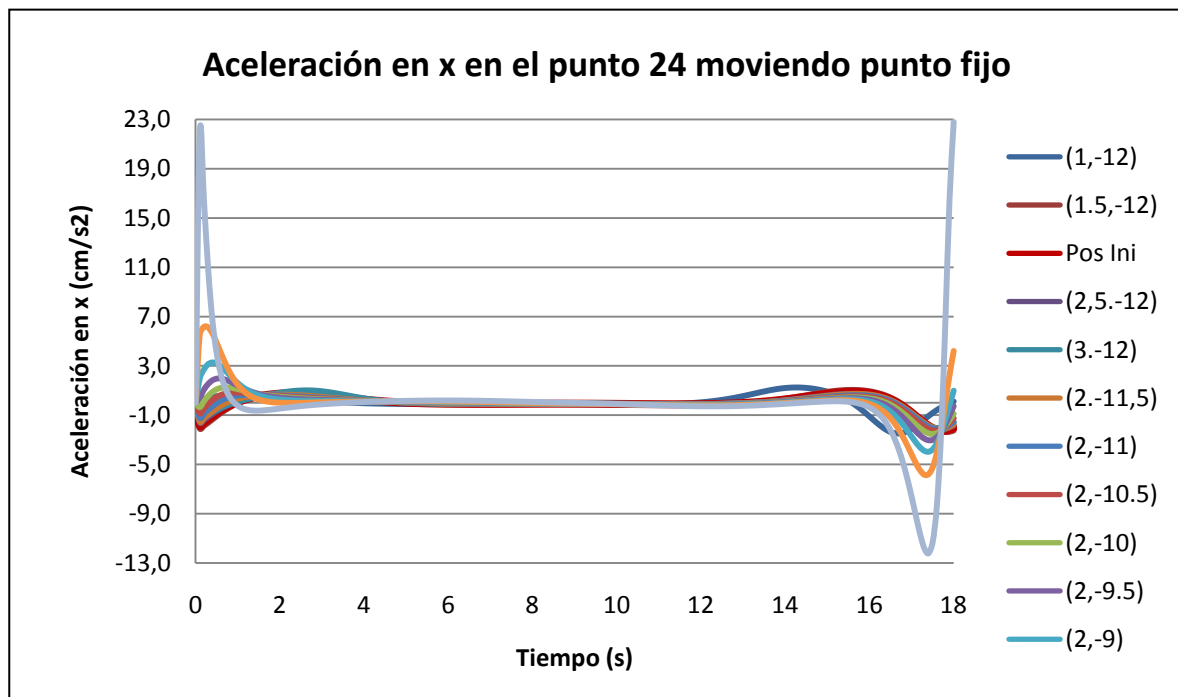
Para distancias de posicionamiento menores a (2,-11.5) las velocidades en el eje de ordenadas son muy parecidas a las obtenidas en el punto inicial. Para distancias mayores al punto fijo dicha velocidad se va incrementando.

PUNTO FIJO



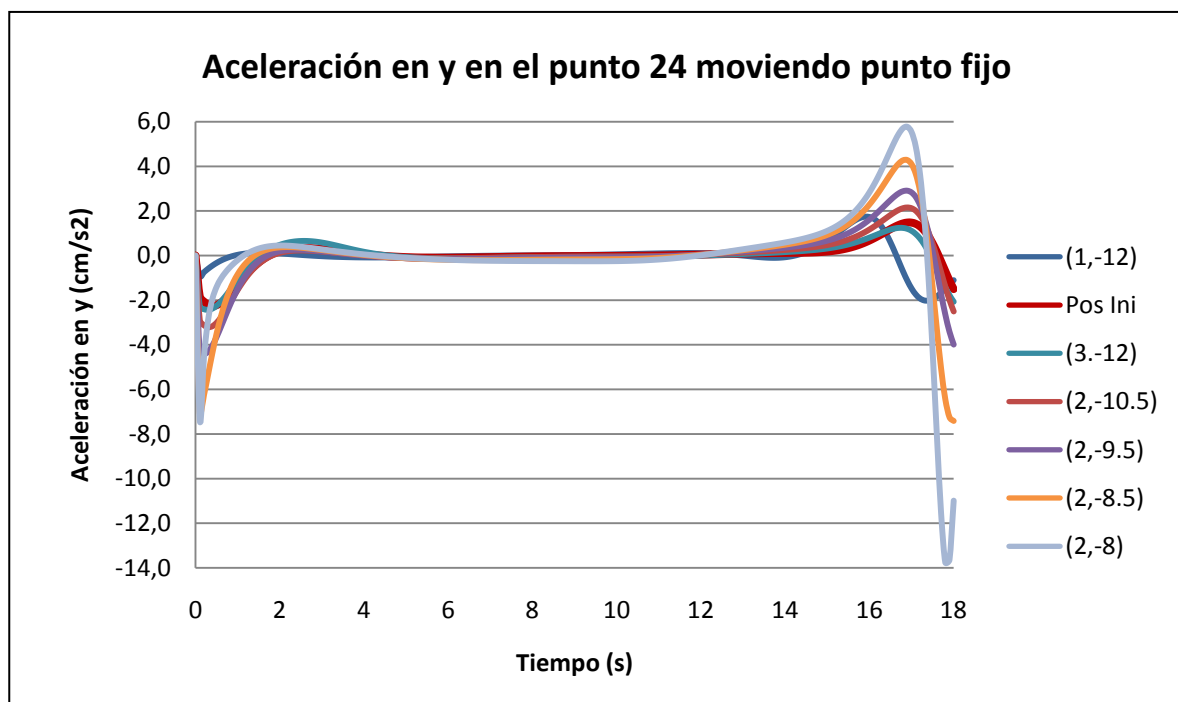
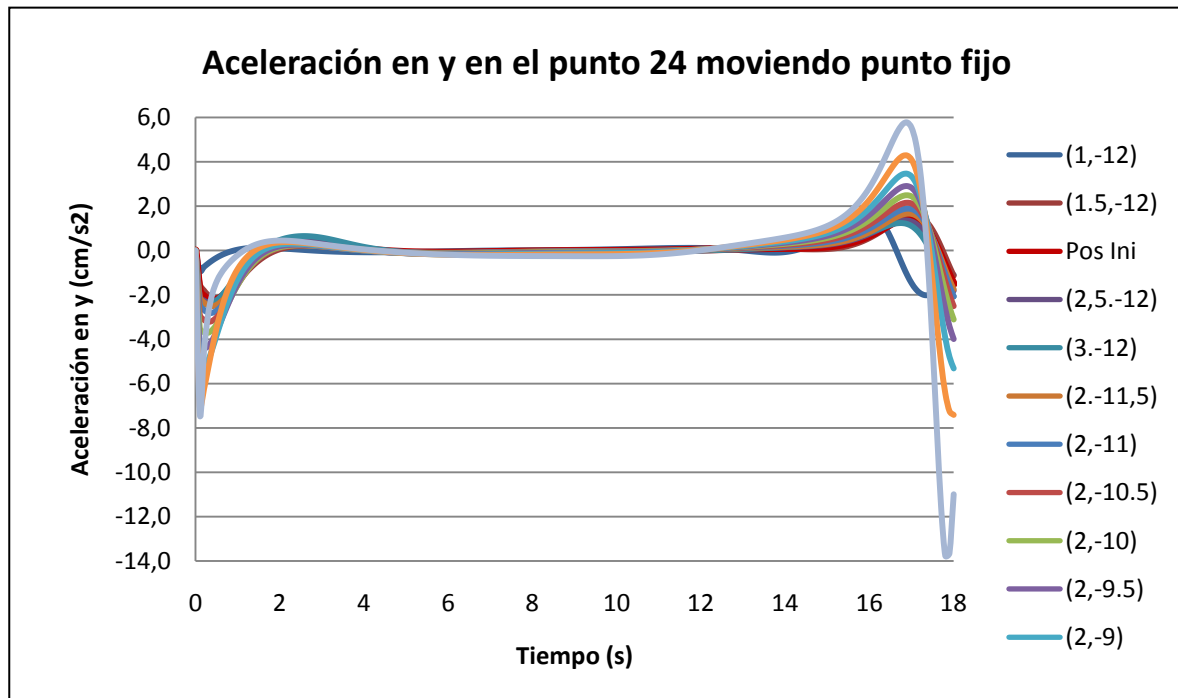
Para distancias de posicionamiento menores a (2,-11.5) las velocidades absolutas son muy parecidas a las obtenidas en el punto inicial. Para distancias mayores al punto fijo dicha velocidad se va incrementando.

PUNTO FIJO



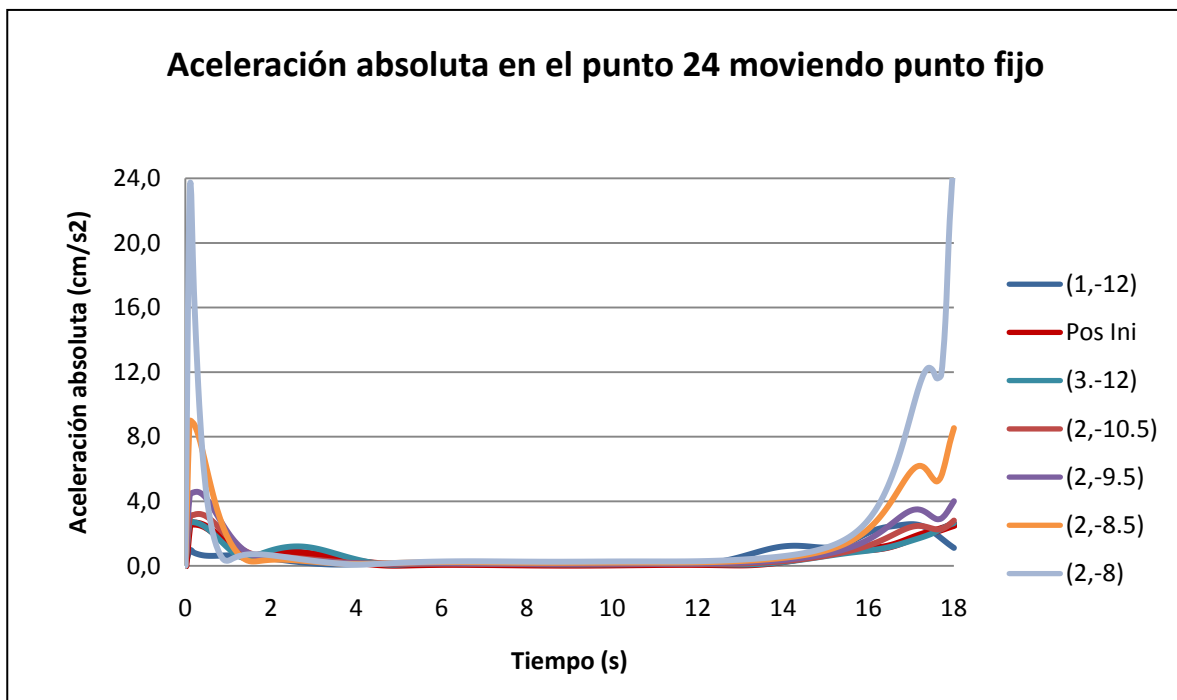
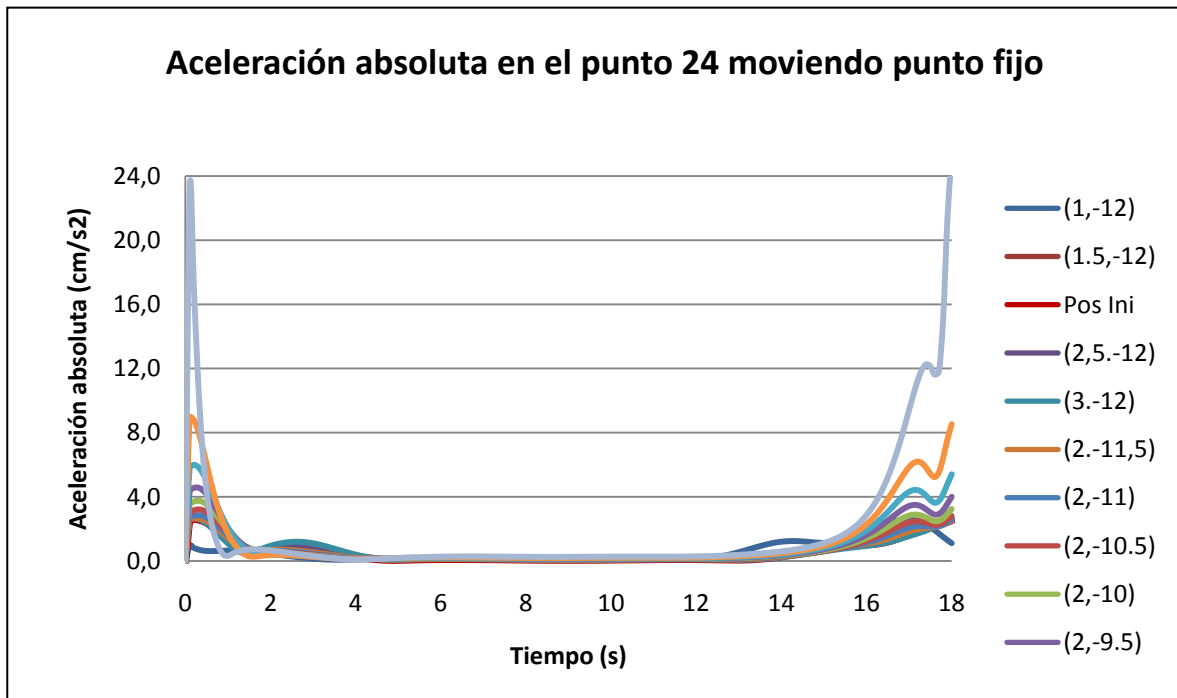
Para el punto fijo más alejado respecto a la posición inicial, se puede apreciar cómo la aceleración en el eje de abscisas se dispara tanto al comienzo como al final del tiempo establecido. En el intervalo de tiempo [4,12] segundos las velocidades son muy parecidas independientemente de la posición del punto fijo, siendo fuera de este intervalo donde se producen las diferencias.

PUNTO FIJO



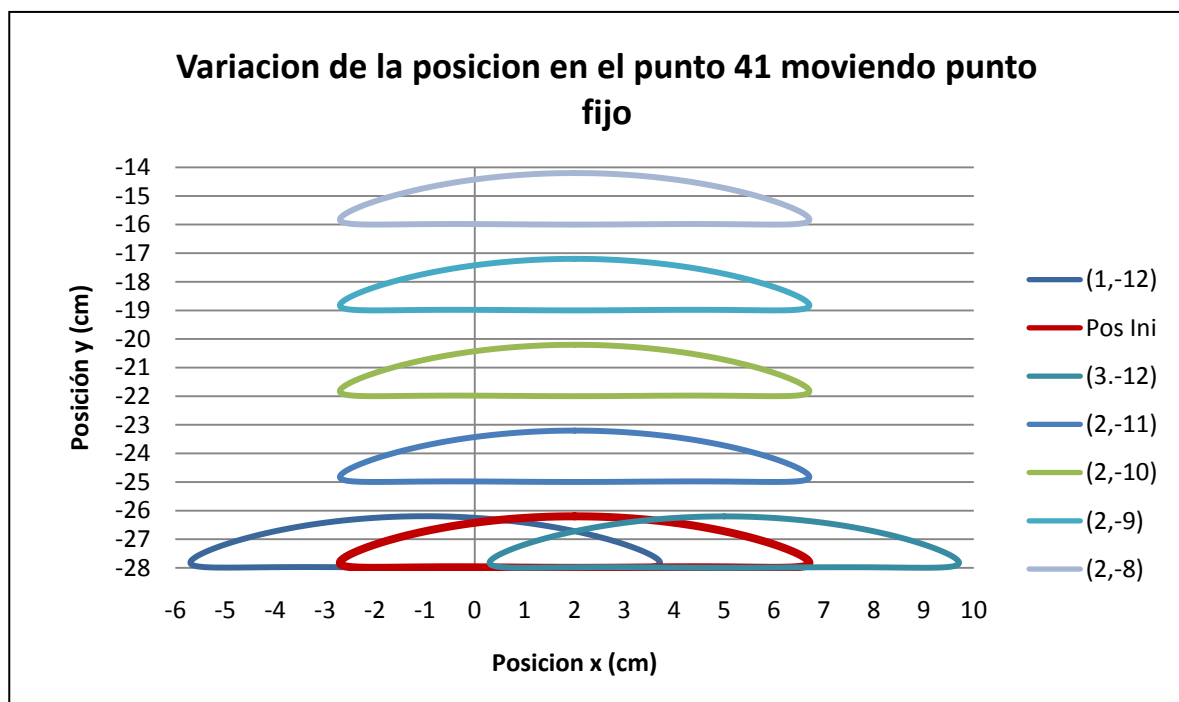
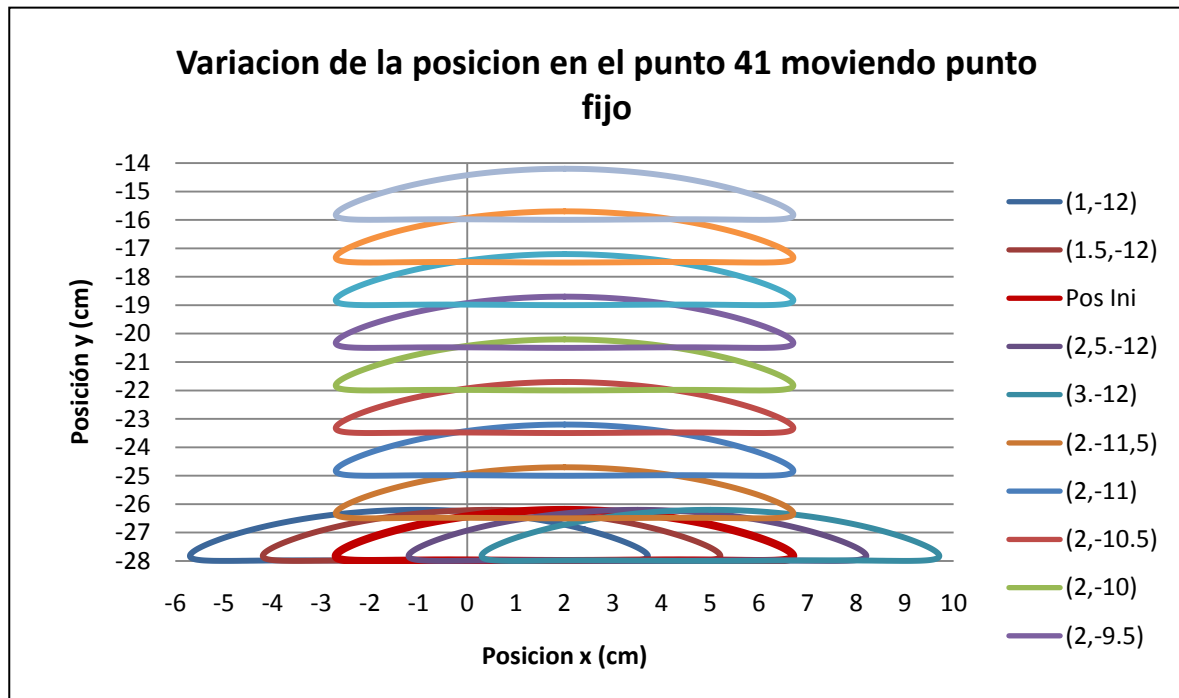
Hasta un instante de 13 segundos, la aceleración obtenida es similar independientemente de la situación del punto fijo. Las principales diferencias se encuentran a partir de dicho instante, quedando éstas resaltadas por la posición del punto fijo más alejada respecto a la de partida.

PUNTO FIJO



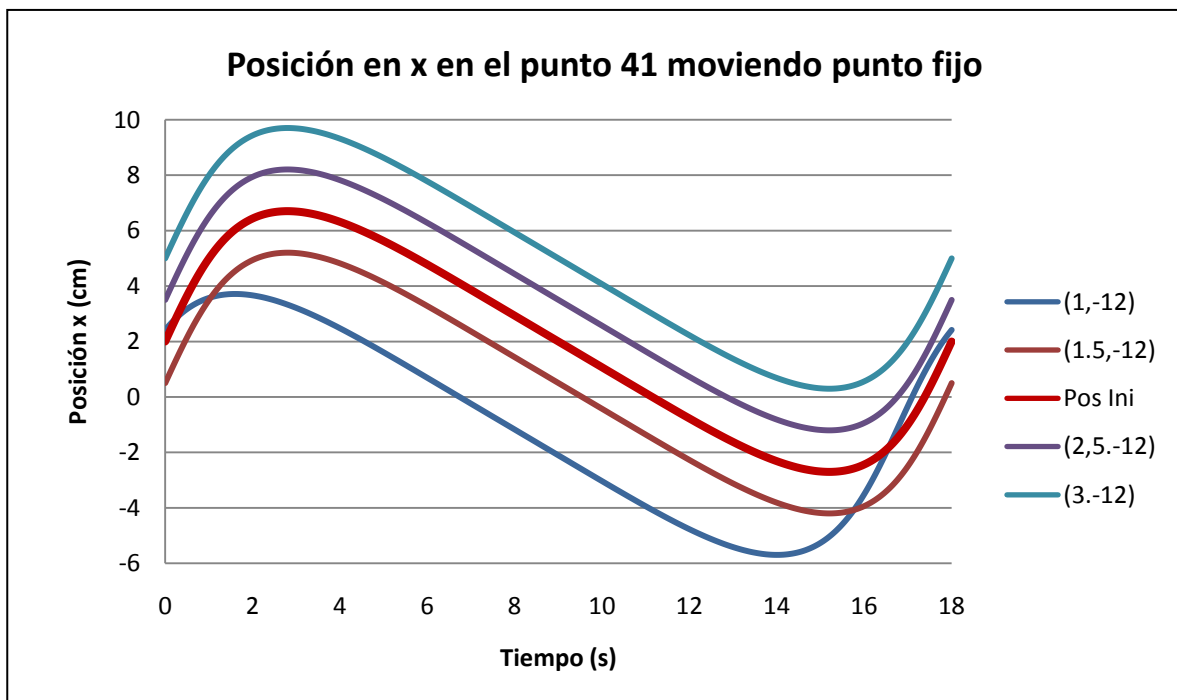
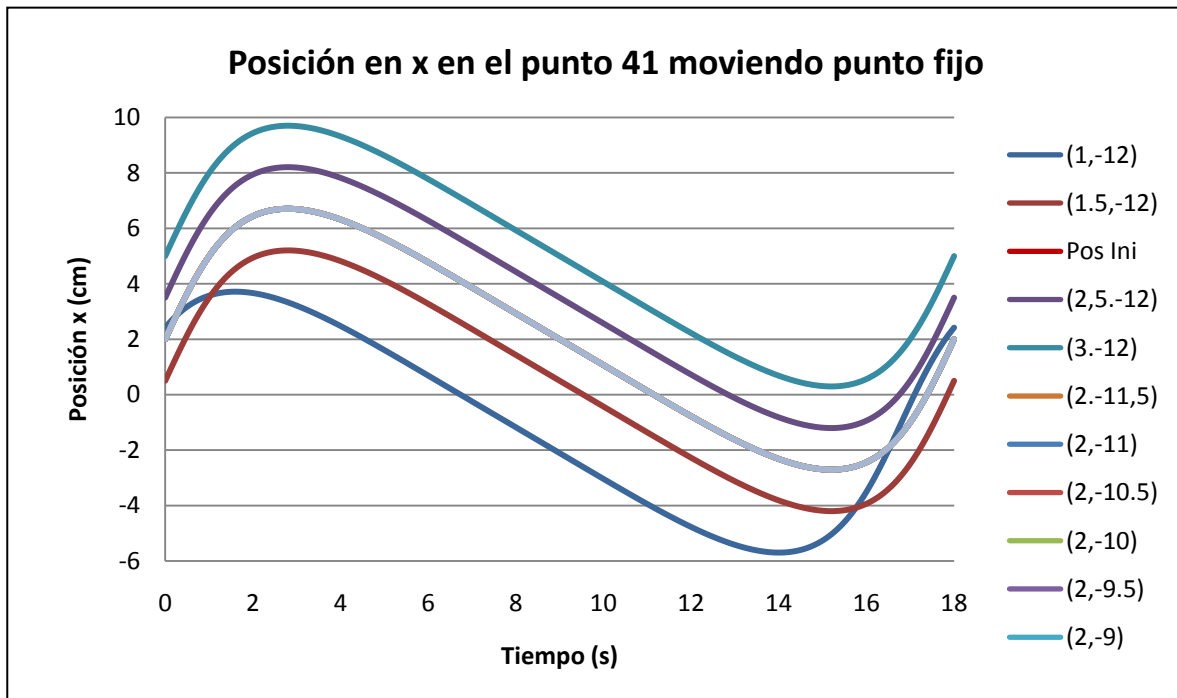
Aceleraciones similares para los distintos posicionamientos del punto fijo, excepto para las dos últimas posiciones más alejadas del punto inicial: (2,-8.5) y (2,-8).

PUNTO FIJO



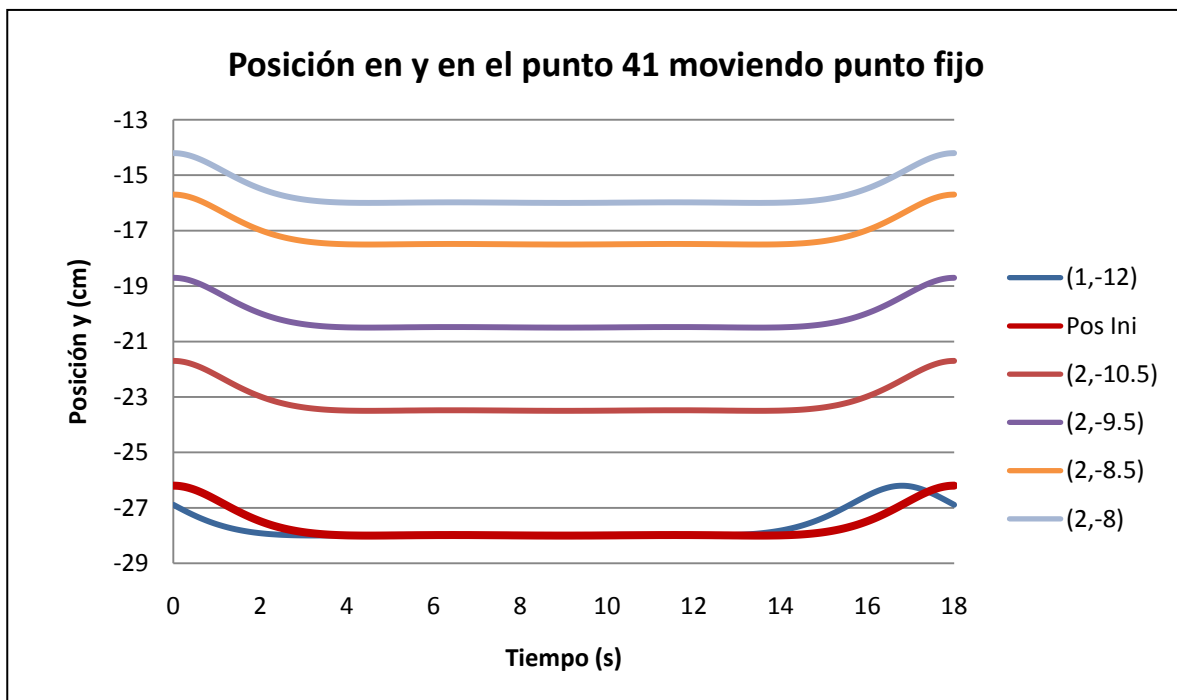
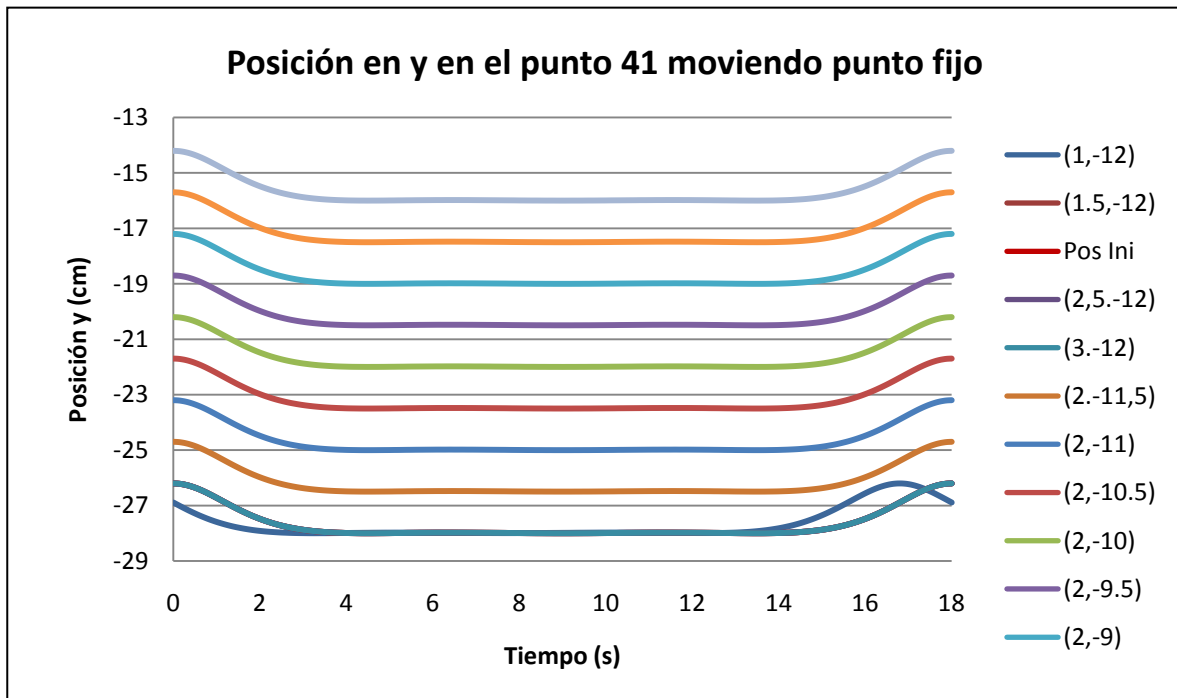
Queda representada la trayectoria del punto 41 según las coordenadas del punto fijo. Se puede apreciar que la trayectoria recorrida para todas las posibilidades es la misma, variando únicamente las coordenadas en las que se producen respecto a los ejes x, y.

PUNTO FIJO



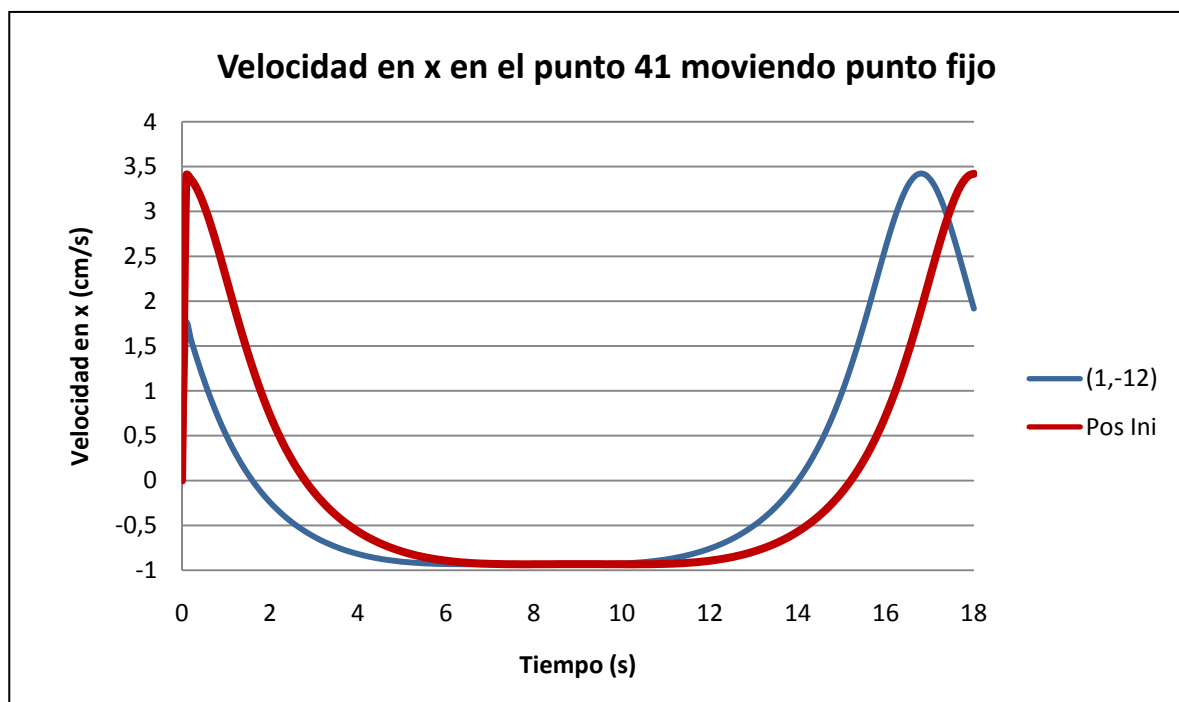
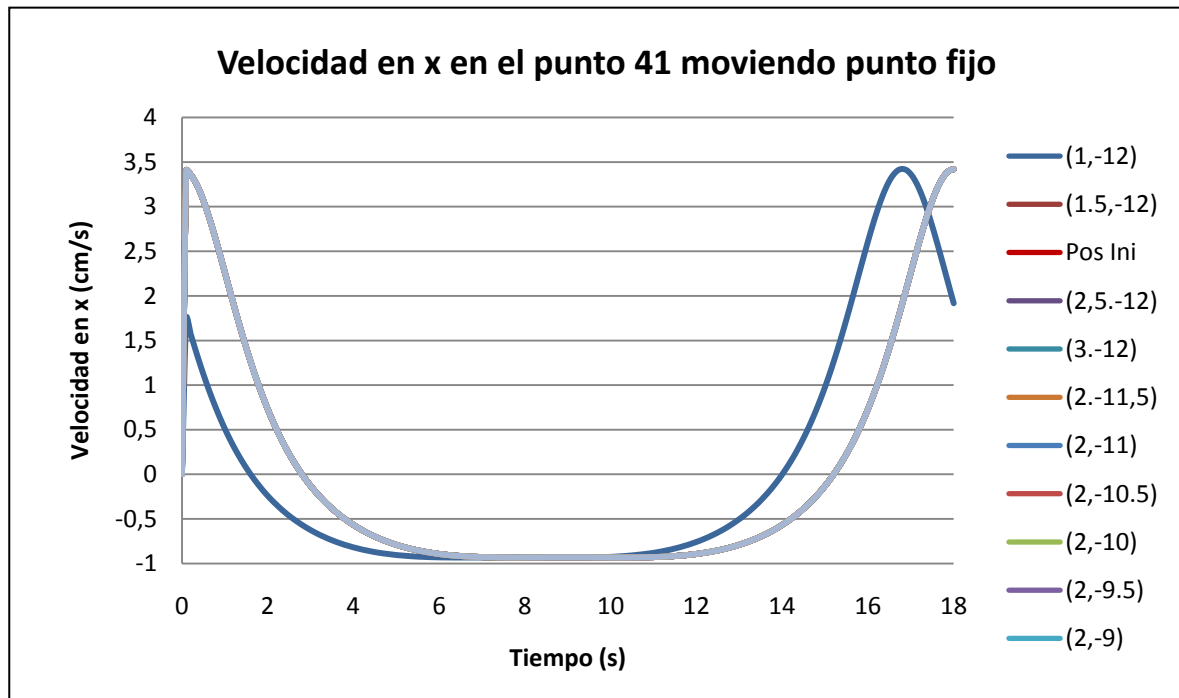
Se observa ahora la representación de la posición respecto al eje de abscisas de cada uno de los puntos fijos con el paso del tiempo.

PUNTO FIJO



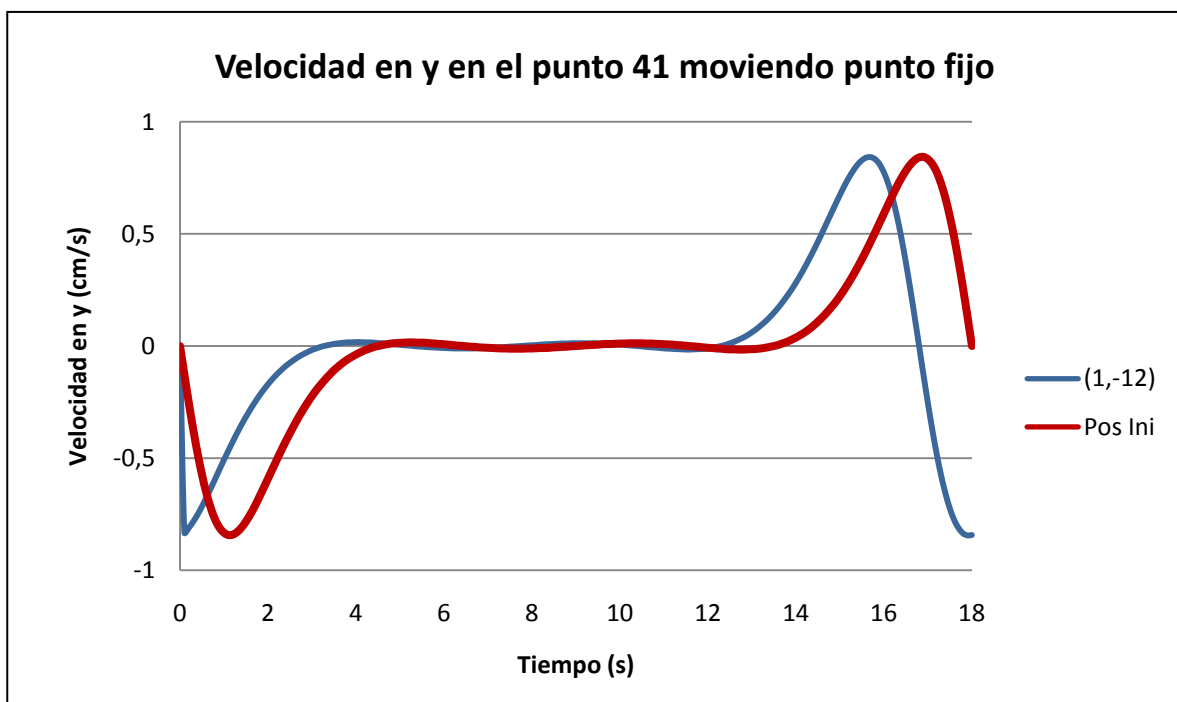
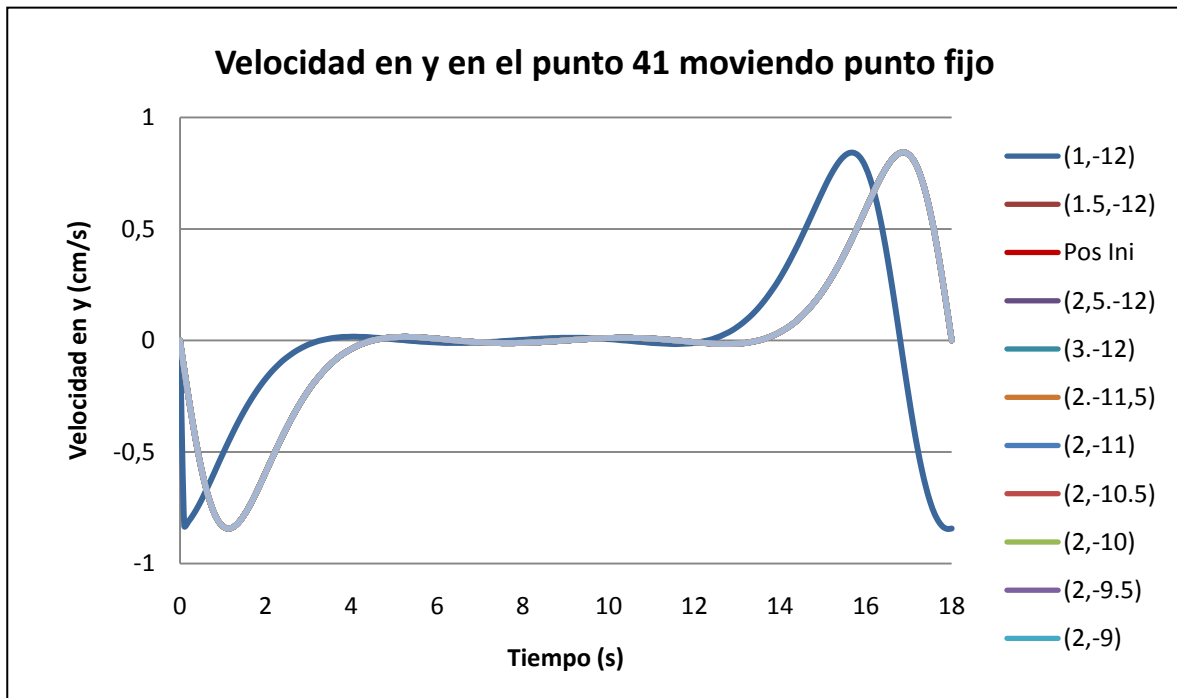
En esta gráfica queda representada la posición respecto al eje de ordenadas para cada una de las posiciones del punto fijo con el paso del tiempo.

PUNTO FIJO



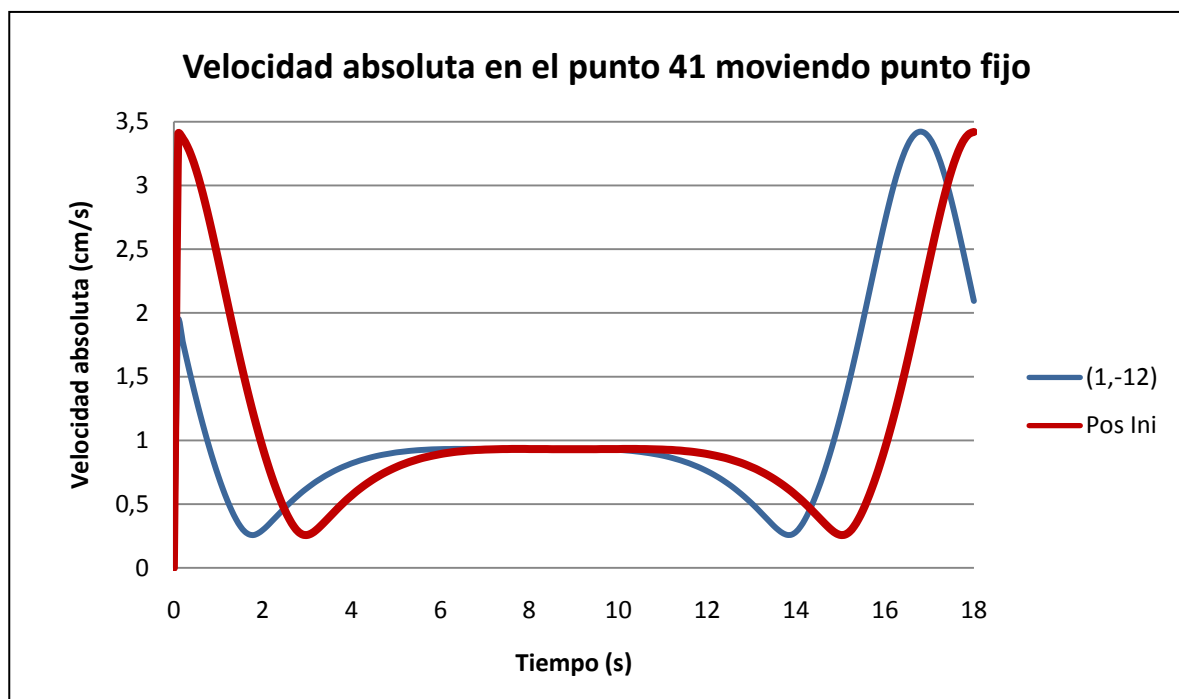
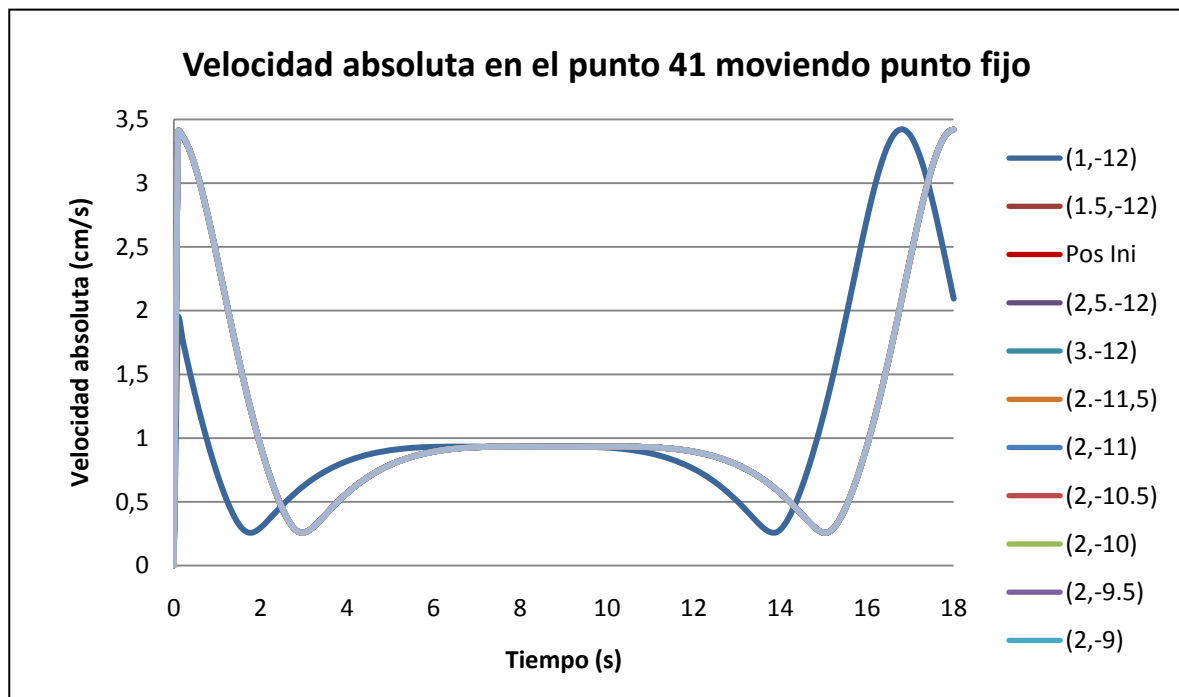
La representación que aparece en la gráfica, queda agrupada por dos líneas. La más oscura para el punto (1,-12), y la más clarita para el resto, ya que sus velocidades son completamente idénticas. Nótese que ambas cuentan con idénticas velocidades tanto máximas como mínimas en el tiempo estudiado.

PUNTO FIJO



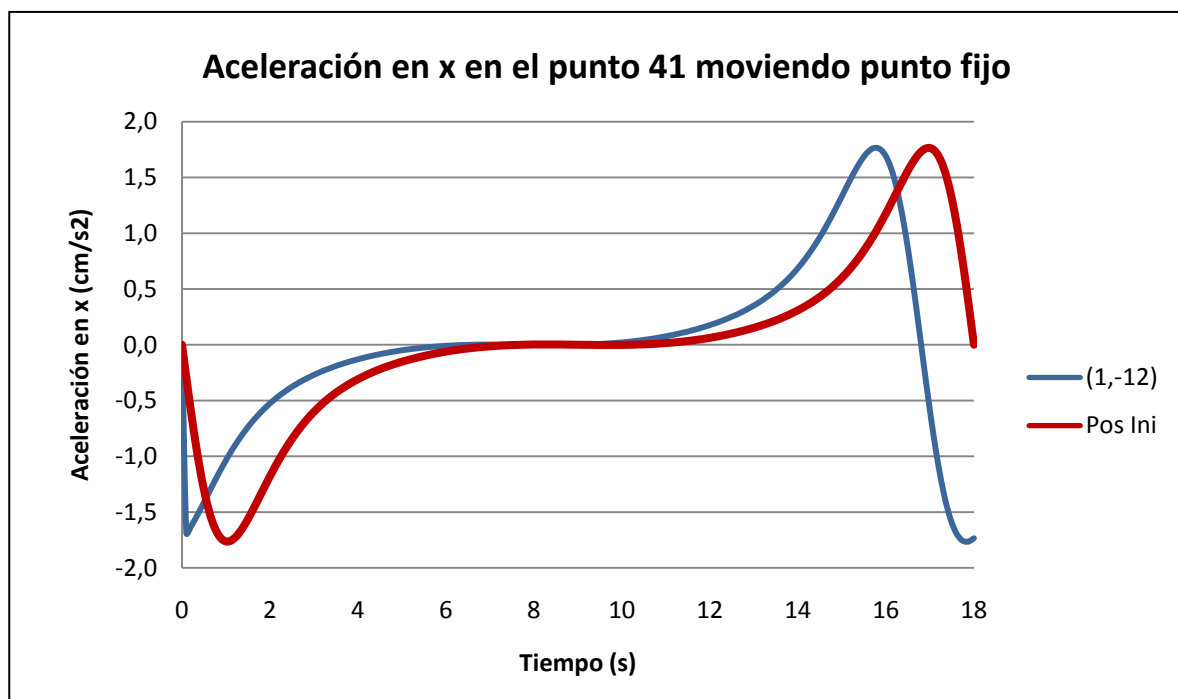
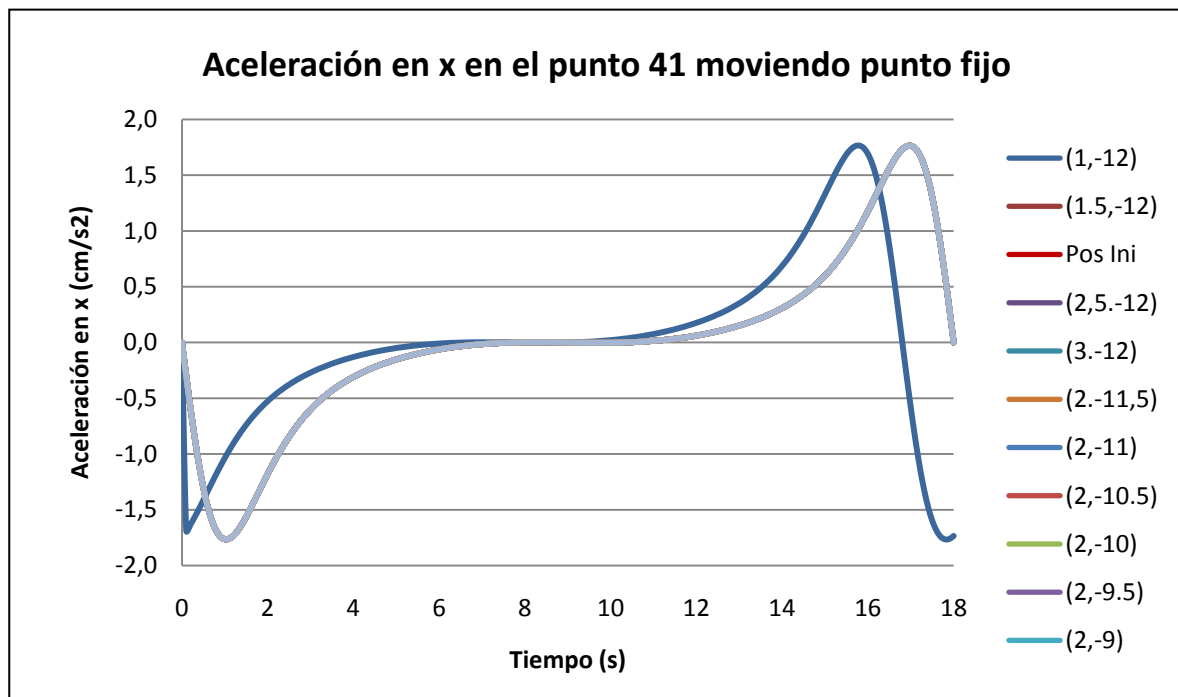
La representación que aparece en la gráfica, queda agrupada por dos líneas. La más oscura para el punto (1,-12), y la más clarita para el resto, ya que sus velocidades son completamente idénticas. Nótese que ambas cuentan con idénticas velocidades tanto máximas como mínimas en el tiempo estudiado.

PUNTO FIJO



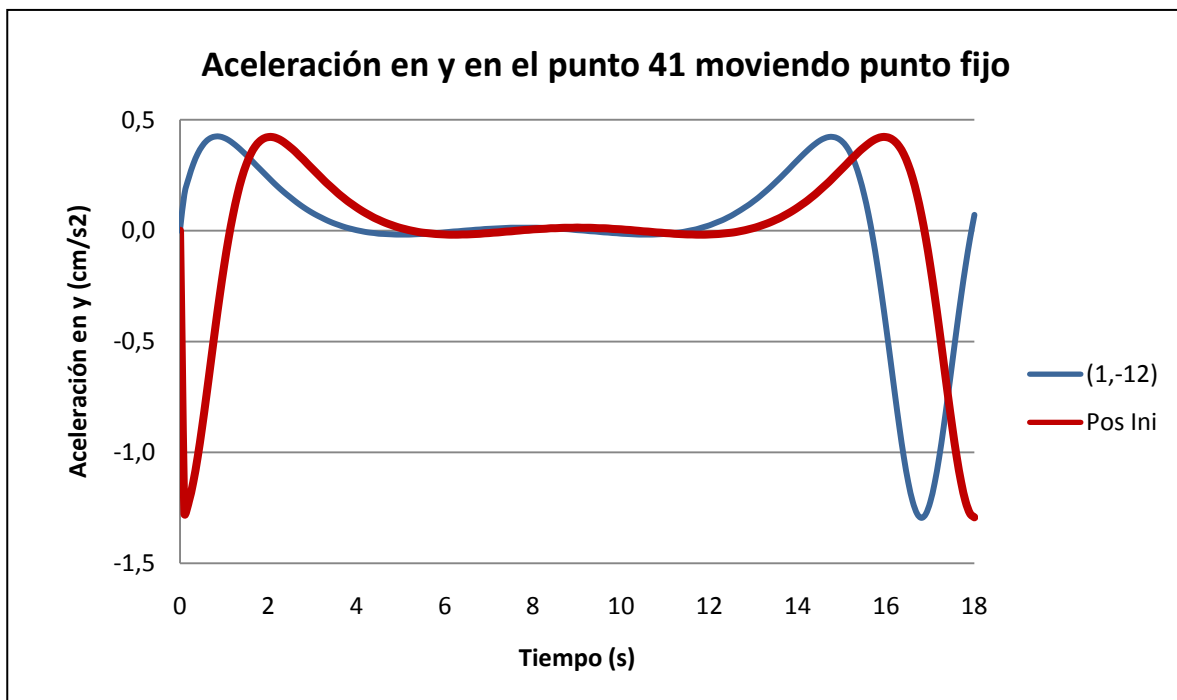
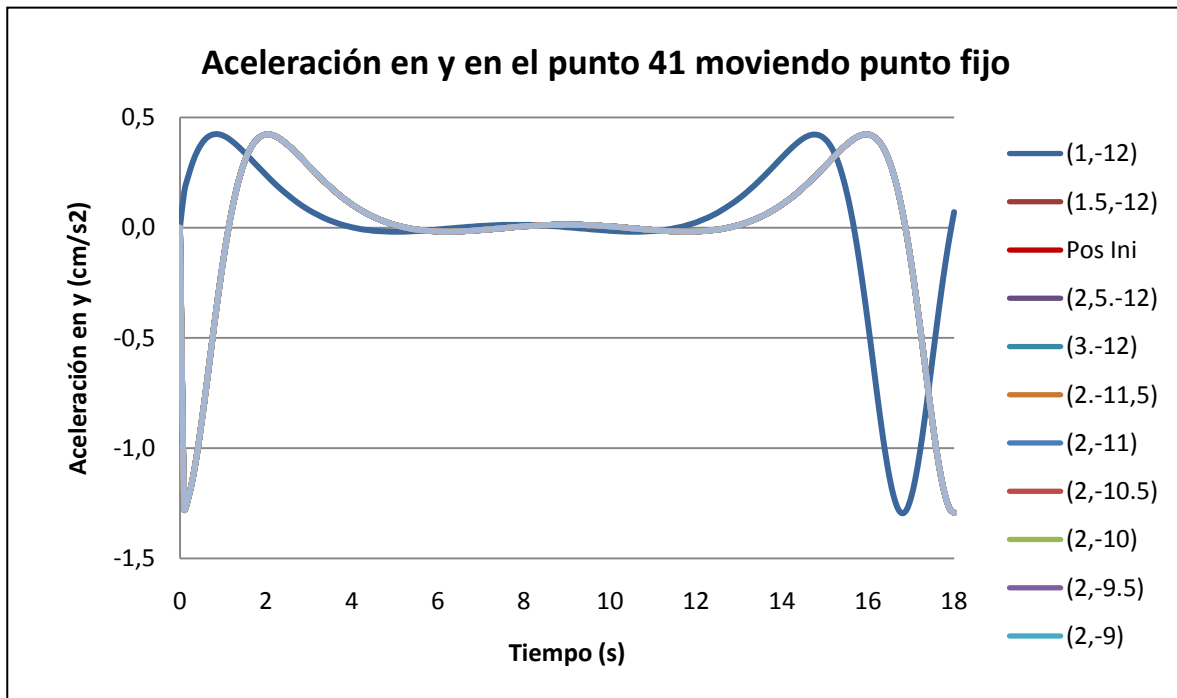
En esta ocasión, la velocidad absoluta, al igual que en las velocidades tanto en y como en x, queda agrupada por dos líneas: la más oscura para el punto (1,-12), y la más clarita para el resto, ya que sus velocidades son completamente idénticas. Nótese que ambas cuentan con idénticas velocidades tanto máximas como mínimas en el tiempo estudiado.

PUNTO FIJO



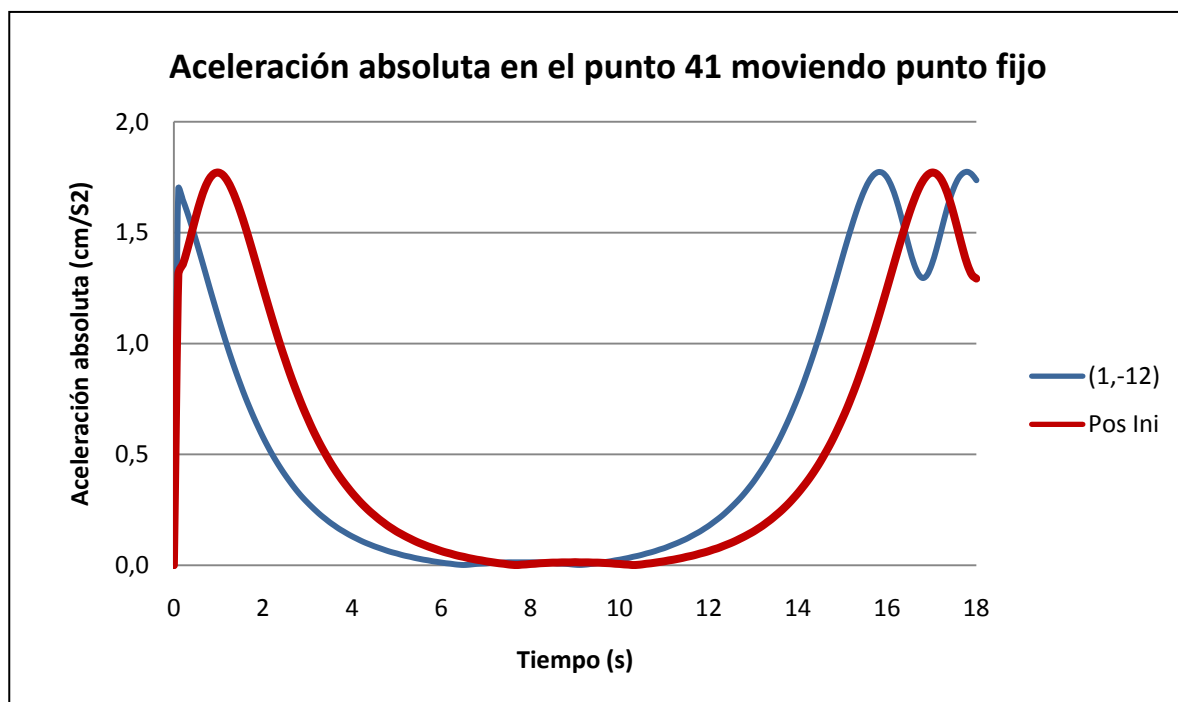
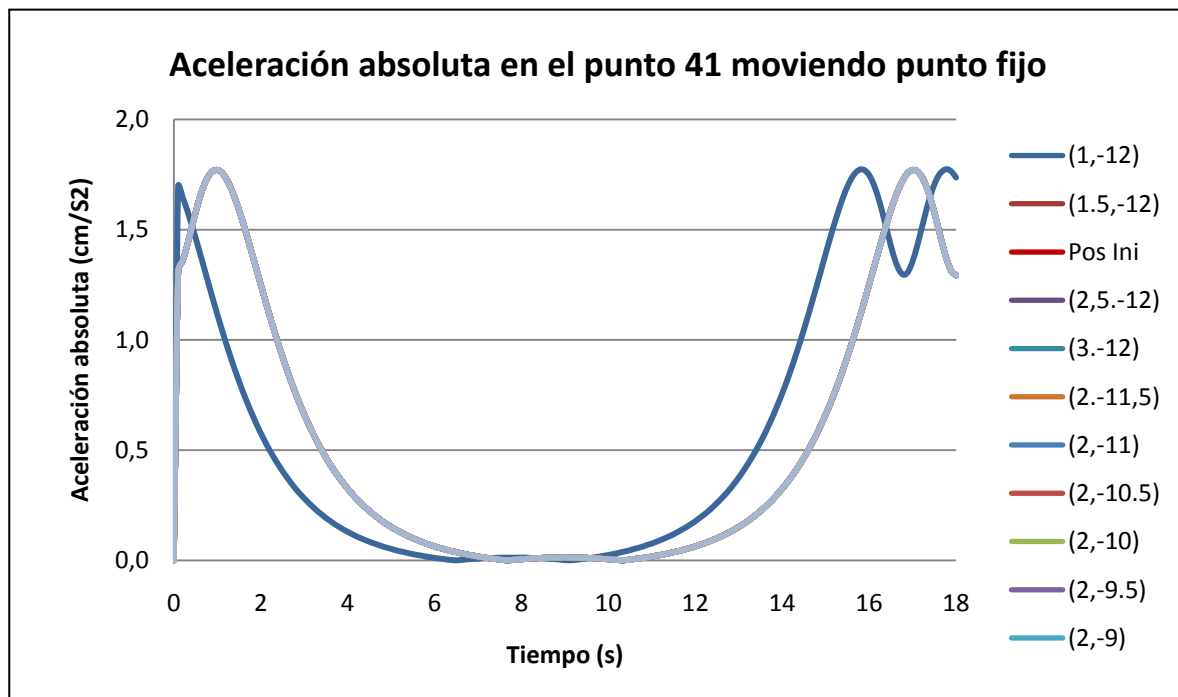
Al igual que para las velocidades, la representación gráfica queda agrupada por dos líneas. La más oscura para el punto (1,-12), y la más clarita para el resto, ya que sus aceleraciones son completamente idénticas. Nótese que ambas cuentan con idénticas aceleraciones tanto máximas como mínimas en el tiempo estudiado.

PUNTO FIJO



Al igual que para las velocidades, la representación gráfica queda agrupada por dos líneas. La más oscura para el punto (1,-12), y la más clarita para el resto, ya que sus aceleraciones son completamente idénticas. Nótese que ambas cuentan con idénticas aceleraciones tanto máximas como mínimas en el tiempo estudiado.

PUNTO FIJO



Como no podía ser de otra manera, al igual que para las velocidades, la representación gráfica queda agrupada por dos líneas. La más oscura para el punto (1,-12), y la más clarita para el resto, ya que sus aceleraciones son completamente idénticas. Nótese que ambas cuentan con idénticas aceleraciones tanto máximas como mínimas en el tiempo estudiado.

ANEXO II : Representación gráfica de las variables cinemáticas de un mecanismo ante variaciones dimensionales de sus elementos

Introducción

En este trabajo, se procederá a realizar una representación gráfica de las variables cinemáticas de un mecanismo ante variaciones dimensionales y espaciales de sus eslabones. En este caso, el mecanismo a estudiar es el modelo simplificado de la pata del robot bípedo Pasibot, que aparece representado en la figura 1.



Figura 1.- Modelo Pasibot

El sistema mecánico del Pasibot se trata de un diseño sencillo y optimizado de un robot bípedo, contando éste únicamente con un grado de libertad.

El material de sus eslabones es Aluminio 2024-T351, aleación elegida por su buena maquinabilidad para uso mecánico, y por su uso en diversos estudios universitarios.

El diseño del Pasibot está basado en dos mecanismos: el Pantógrafo y el Chebyshev.

- **Mecanismo de Chebyshev o Hoekens**

Con el mecanismo de Chebyshev, se convierte el movimiento circular del motor en la entrada del mecanismo, en un movimiento de tramo casi rectilíneo y curvo en su salida.

Es un mecanismo simple, formado por tres eslabones: manivela motor, biela y balancín. La manivela transmite el movimiento de rotación a un movimiento compuesto en la biela. A continuación se muestra la representación de dicho mecanismo (figura 2):

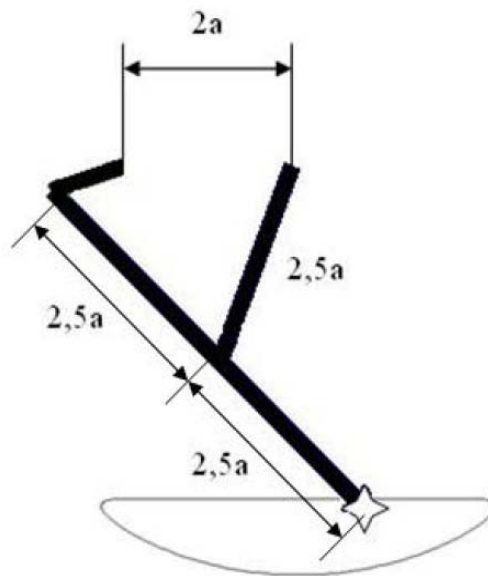


Figura 2.- Mecanismo de Chebyshev o Hoekens

Éste es el mecanismo principal para que el robot funcione correctamente, debido a que es a partir del mismo donde se empieza a transmitir el movimiento. Con la relación de dimensiones mostradas en la figura anterior, se aprecia cómo el movimiento que le transmite el motor a la manivela es un movimiento de salida de la biela formado por un tramo aproximadamente rectilíneo y otro curvo. El movimiento recto corresponde a cuando un pie del robot está totalmente apoyado en el suelo mientras que el otro pie está realizando la trayectoria curva que lo desplaza hacia adelante, intercambiándose posteriormente las funciones una vez que dicho pie apoya en el suelo.

- **Mecanismo de Pantógrafo**

El Pantógrafo es un mecanismo inventado con el fin de reproducir figuras a escala o incluso copiarlas. Se trata de un mecanismo de 5 eslabones y cadena abierta, con 2 grados de libertad. Para ello se varía la distancia entre los puntos de articulación de cada uno de los eslabones, conservando siempre la condición de paralelismo entre ellos dos a dos (figura 3).

Los eslabones que forman el Pantógrafo, se pueden asemejar a la pierna humana, dando así pues al fémur, la tibia y el peroné. Todos ellos están conectados entre si de tal forma que se pueden mover respecto del punto fijo (pivote que une el Chebyshev con el Pantógrafo).

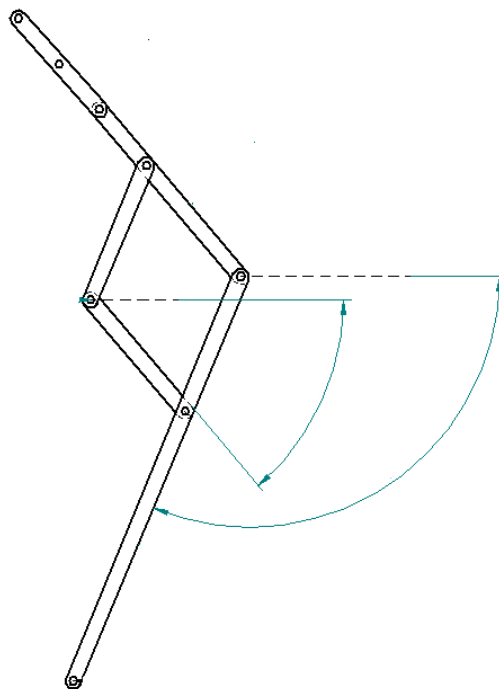


Figura 3.-Mecanismo de Pantógrafo

Más concretamente, para el modelo simplificado correspondiente a al pata del Pasibot, se consigue aumentar e invertir el movimiento generado por el mecanismo de Chebyshev (figura 4).

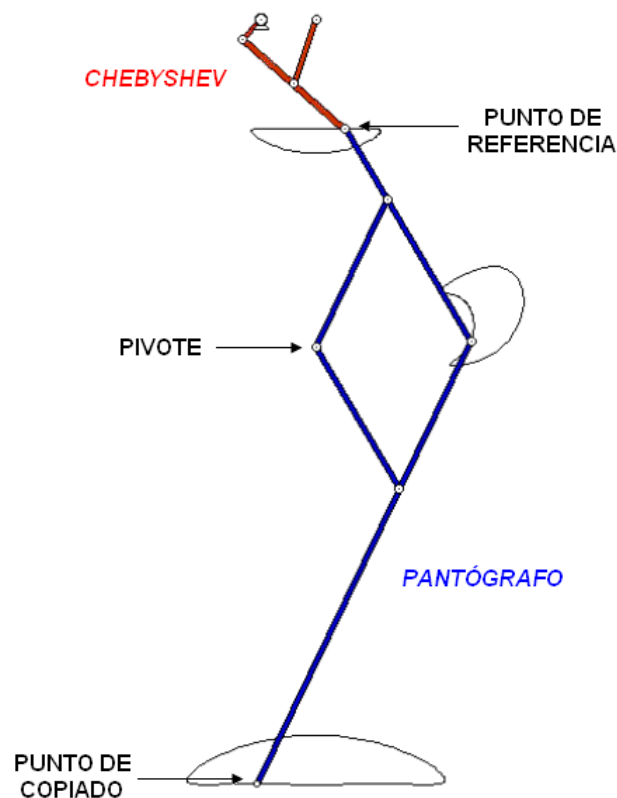


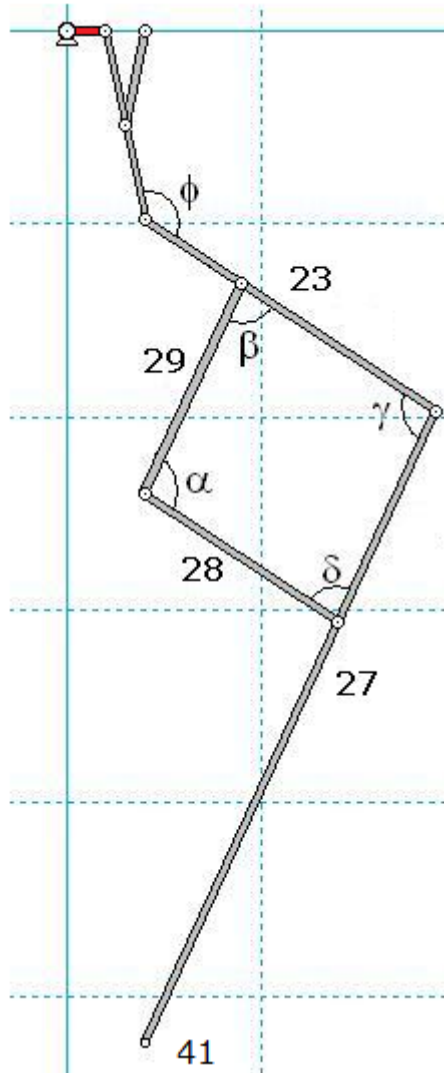
Figura 4.-Trayectorias de Chebyshev y Pantógrafo

Para la consecución de este trabajo, se parte de un estudio realizado anteriormente. Dicho estudio, consistía en una verificación de las trayectorias de varios puntos del mecanismo (Pasibot) en función de las longitudes de algunas de las barras y de la posición de uno de los apoyos. Para ello, se utilizó el programa Working Model. Dicho programa, es una herramienta de CAE que permite crear simulaciones de sistemas mecánicos reales que permiten reducir el tiempo de creación de un producto, mejorando la calidad final y optimizando los cálculos. Se trata de una herramienta muy útil para los ingenieros para crear y analizar los sistemas mecánicos reales.

Así pues, a partir de los datos generados por el programa Working Model, se ha procedido a su respectiva representación gráfica mediante el programa de hojas de cálculo Excel. Es aquí, ante la representación gráfica, donde podemos apreciar cómo se comporta el mecanismo ante la diversidad de variaciones aplicadas. Se quiere comentar de una forma clara y precisa las variaciones producidas en cada una de las gráficas, resaltando y haciendo hincapié en las más notorias y significativas.

Por así decirlo, se obtiene un análisis cinemático correspondiente a la rodilla (punto 24) y al pie o tobillo (punto 41).

En la siguiente figura (figura 5), quedan perfectamente identificadas las barras (23,27, 28 y 29), los puntos a estudiar correspondientes a las rodilla (24) y al pie o tobillo (41), y la manivela (representada en color rojo).



Los parámetros de partida para la realización de este trabajo son:

- Se trabaja con el modelo simplificado del Pasibot, concretamente con su pata.
- El mecanismo representado está a escala 1:3 del Pasibot original
- Los datos de partida han sido generados por un estudio anterior con el programa de CAE Working Model.
- El tiempo de estudio estaba prefijado en 18 segundos, que es el ciclo completo de la manivela (representada en la siguiente figura en color rojo).
- El sentido de giro de la manivela es horario.

Figura 5.-Representación del mecanismo

El estudio en sí, consiste en:

- La representación de las variaciones cinemáticas producidas en los puntos 24 (rodilla) y 41 (tobillo o pie).
- Las variaciones realizadas se pueden dividir en cuatro apartados:
 - Barra 23 (cm)

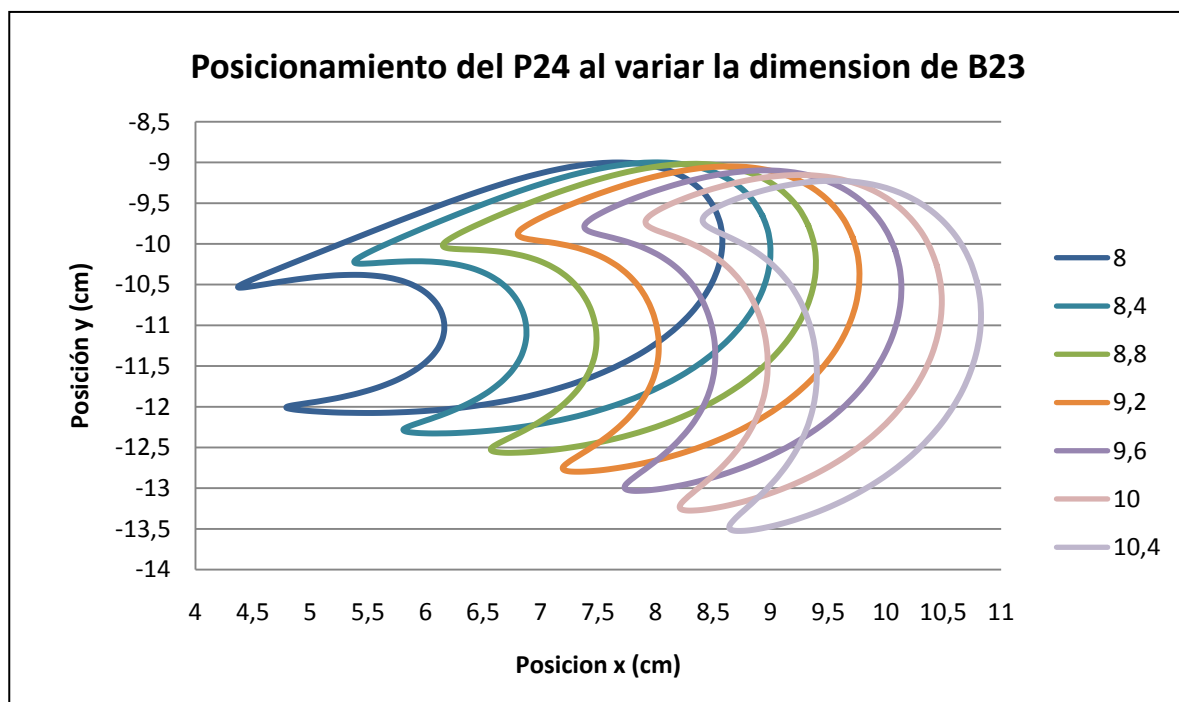
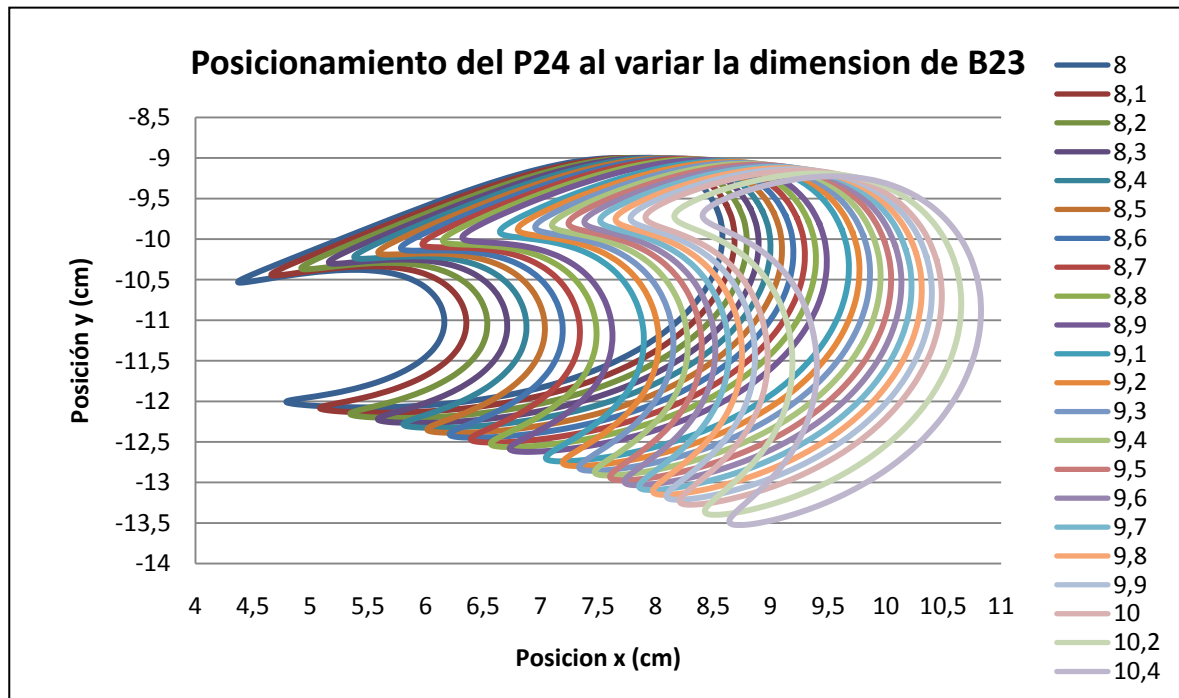
(8, 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6, 8.7, 8.8, 8.9, 9, 9.1, 9.2, 9.3, 9.4, 9.5, 9.6, 9.7, 9.8, 9.9, 10, 10.2, 10.4)
 - Barra 27 (cm)

(15, 16, 16.5, 17, 17.1, 17.2, 17.3, 17.4, 17.5, 17.6, 17.7, 17.8, 17.9, 18.1, 18.2, 18.3, 18.4, 18.5, 18.6, 18.7, 18.8, 18.9, 19, 19.5, 20, 21)
 - Barra 28 (cm)

(5, 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 7)
 - Barra 29 (cm)

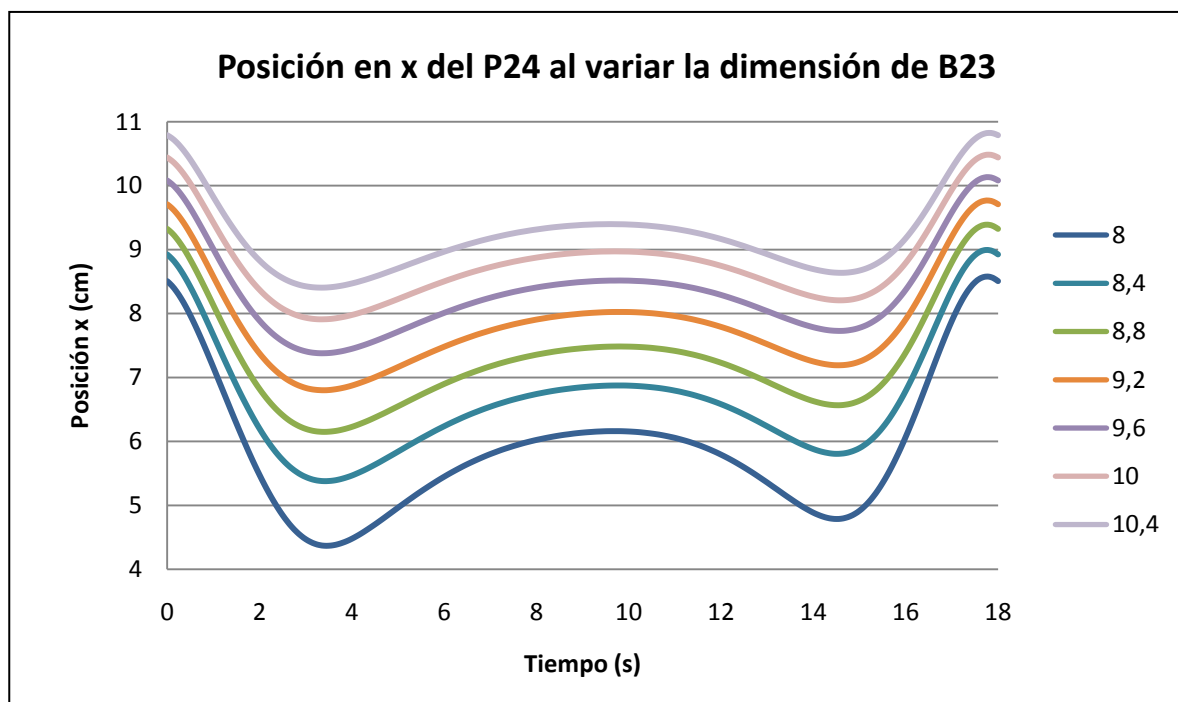
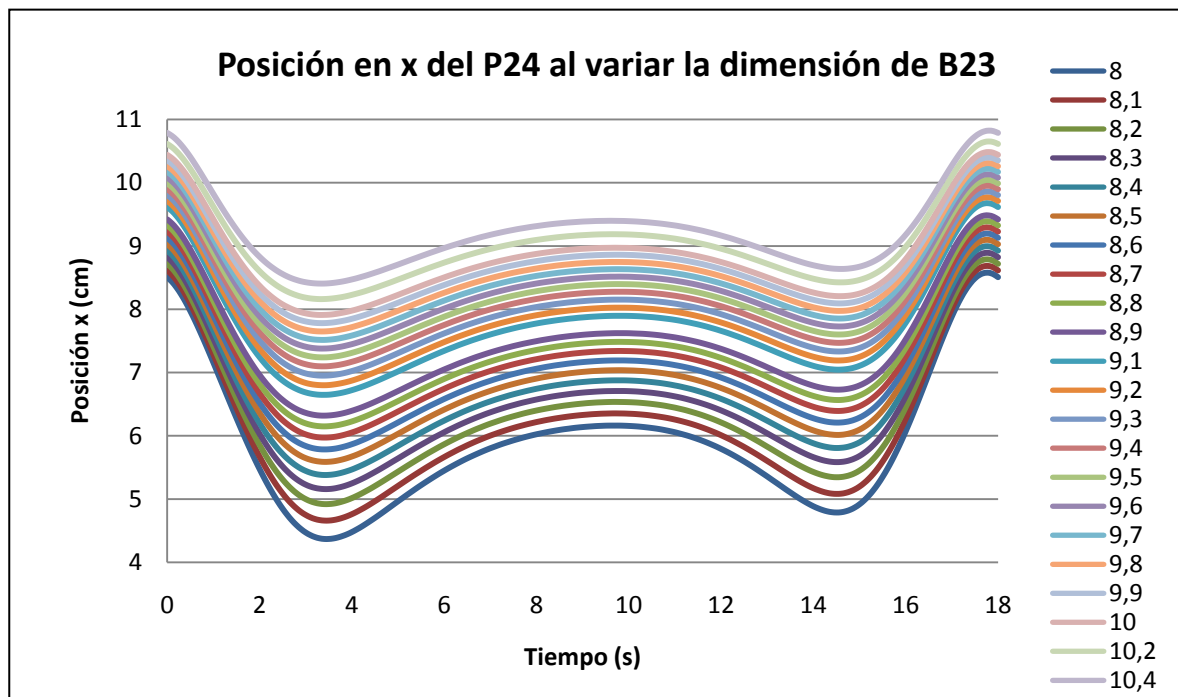
(5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 6.1, 6.2, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 7)
- Para cada variación realizada ha sido representada:
 - Posición en el eje y frente al eje x
 - Posición en el eje x frente al tiempo
 - Posición en el eje y frente al tiempo
 - Velocidad en el eje x frente al tiempo
 - Velocidad en el eje y frente al tiempo
 - Velocidad absoluta frente al tiempo
 - Aceleración en el eje x frente al tiempo
 - Aceleración en el eje y frente al tiempo
 - Aceleración absoluta frente al tiempo

BARRA 23



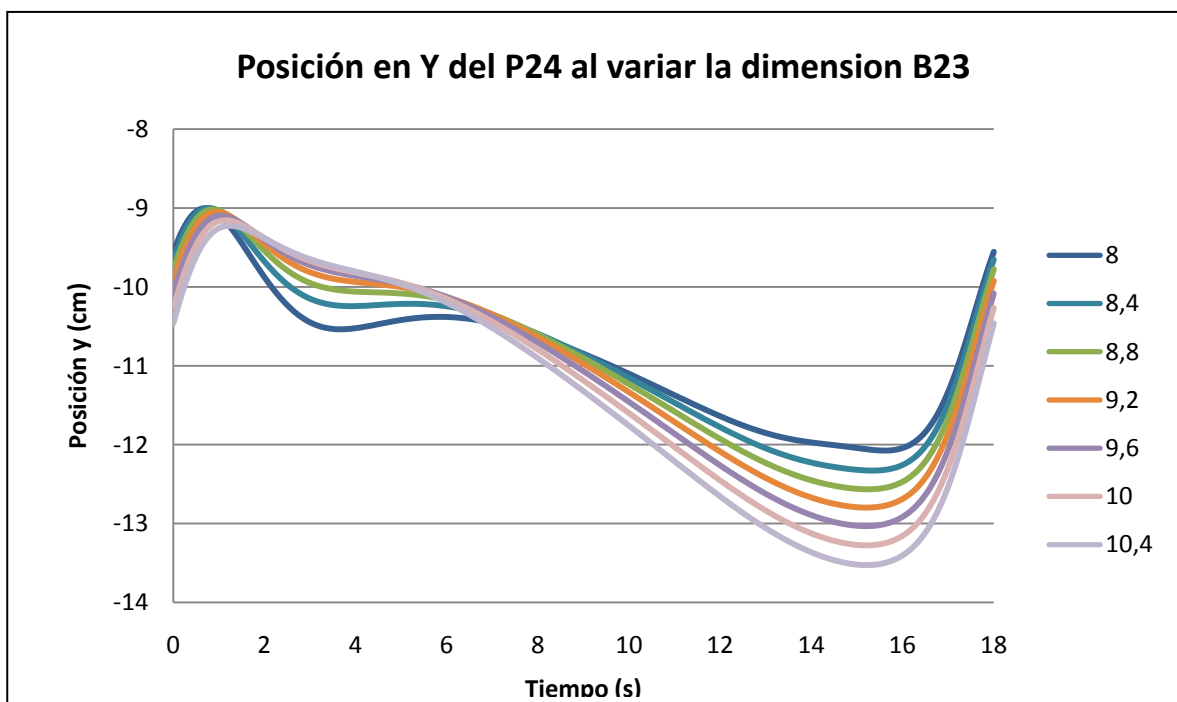
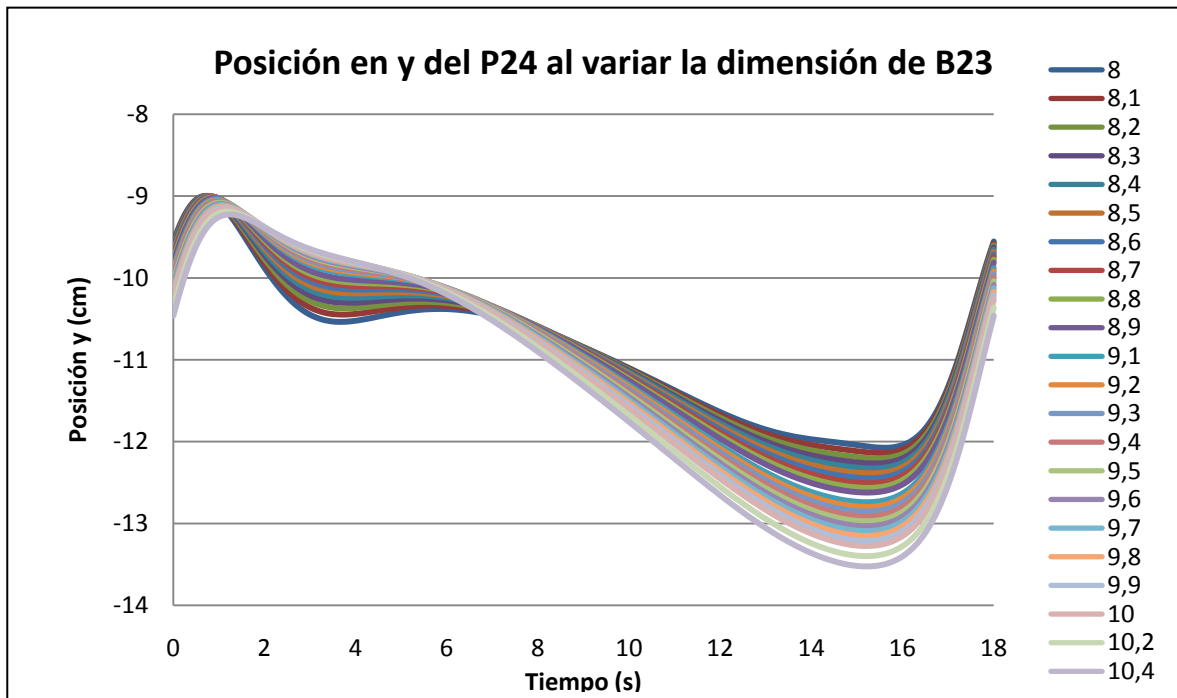
Se observa que para un tamaño menor de la barra, recorre más distancia en el eje x que en el eje y, y a medida que aumenta el tamaño de la barra, se ve cómo hay descenso de la distancia en el eje x y un aumento en la distancia recorrida en el eje y.

BARRA 23



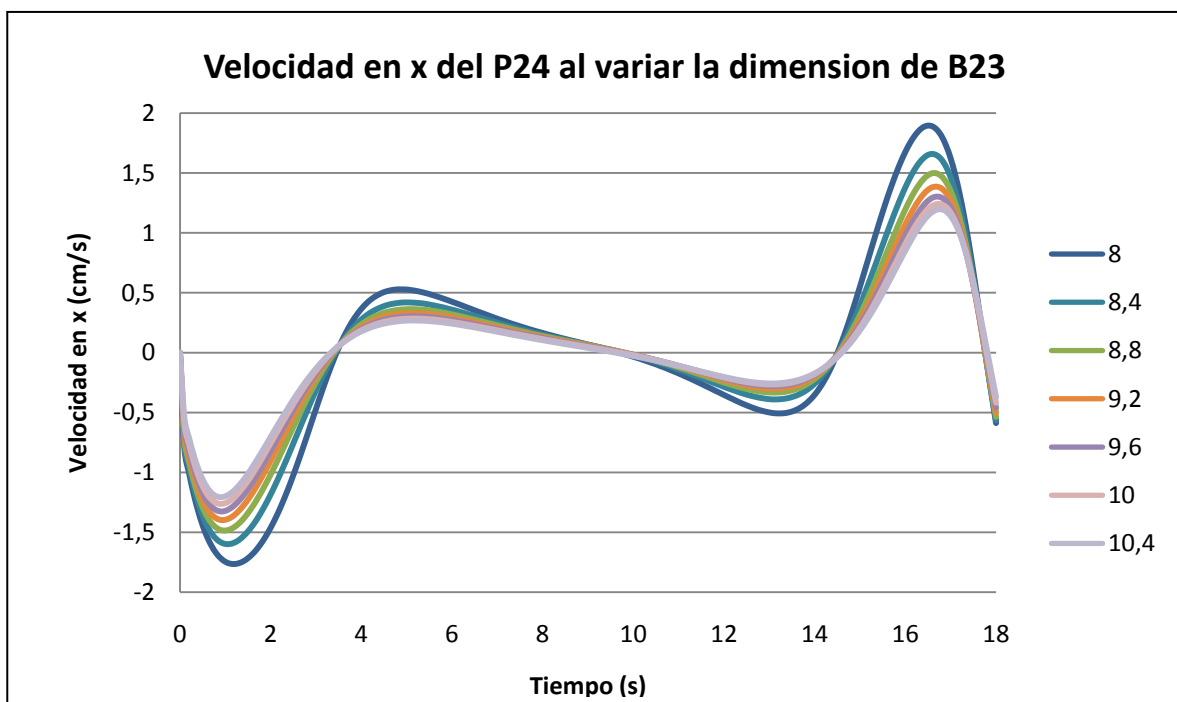
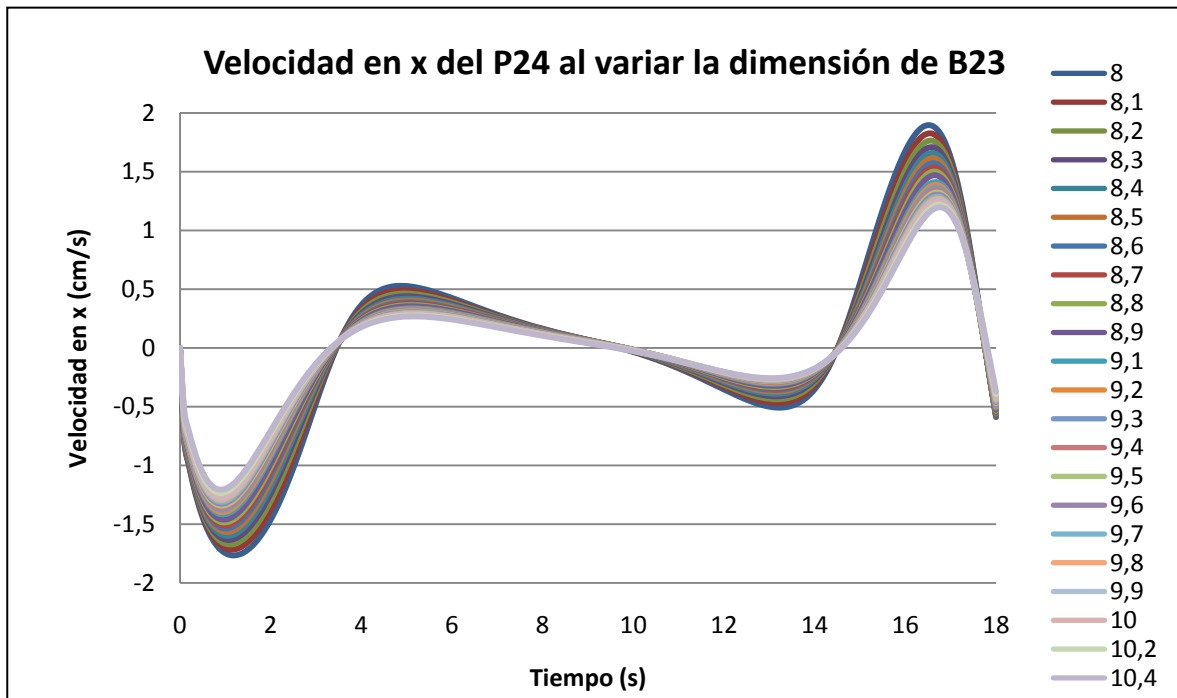
Para el tiempo comprendido entre los 4 y 15 segundos, aproximadamente, la posición que va alcanzando la barra va siendo proporcional a medida que se va aumentando el tamaño de la misma. Así pues, cuanto mayor sea el tamaño de la barra, mayor es la posición alcanzada en el eje de abscisas.

BARRA 23



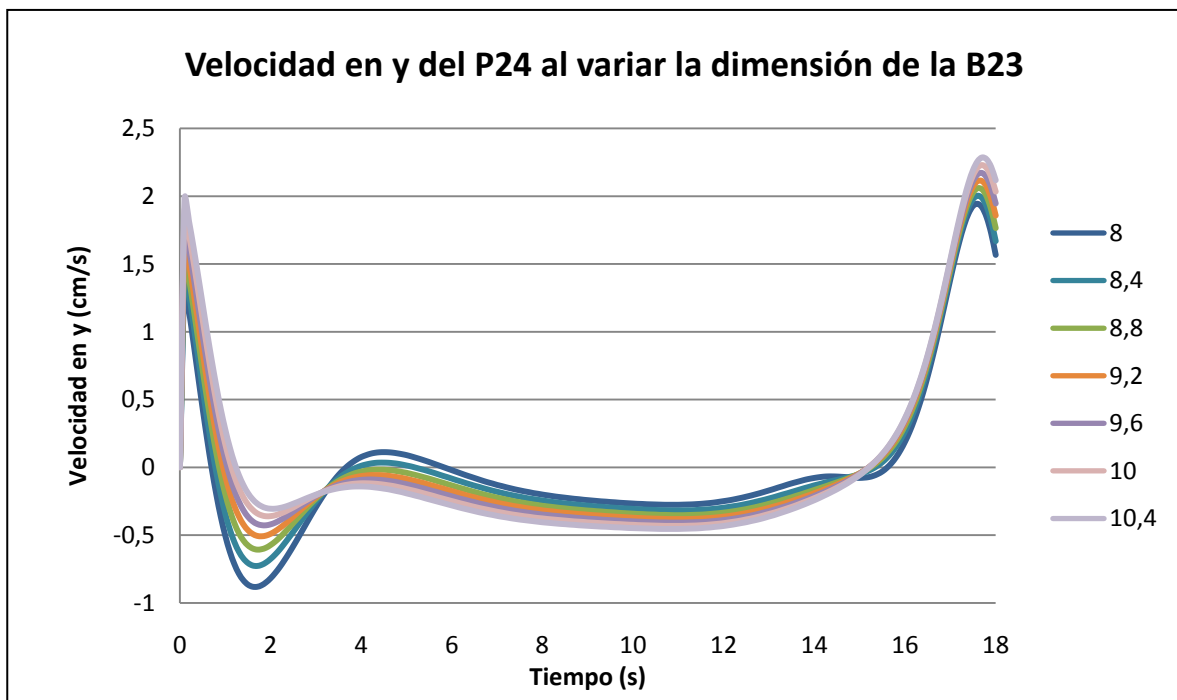
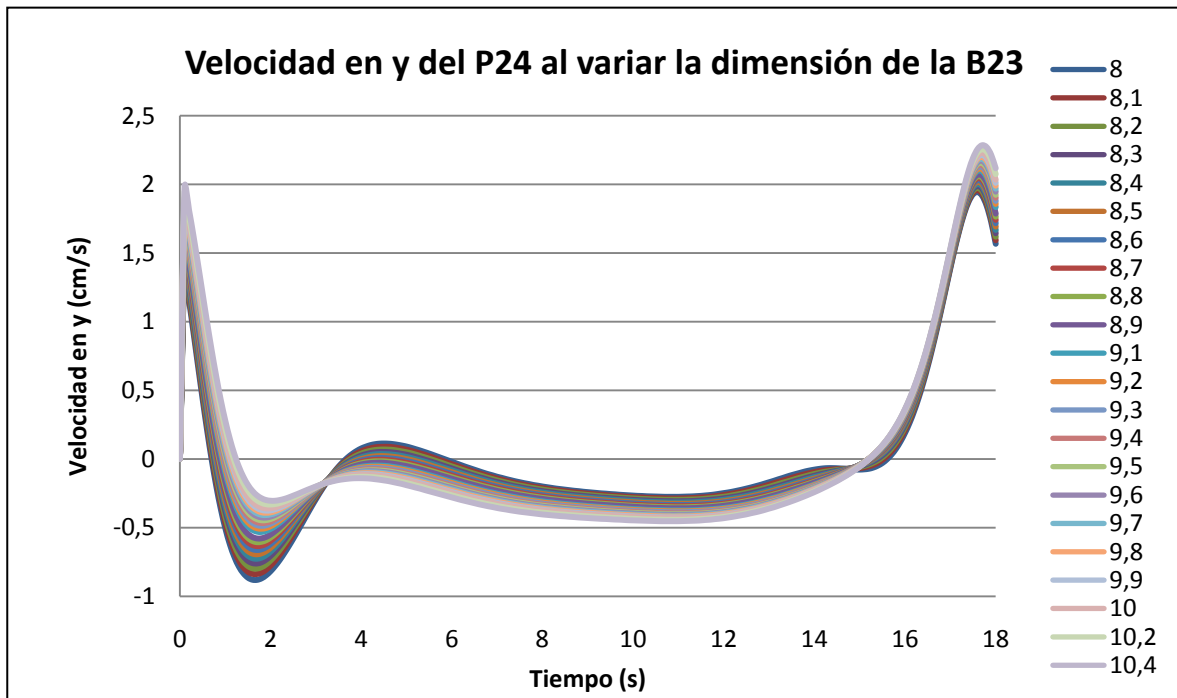
A la vista de los resultados, los datos son más o menos parejos salvo en torno a los 4 y 15 segundos. Es en el primero cuando se puede apreciar que medidas de la barra inferiores a los 8,8 cm van a cambiar de forma significativa la evolución. En torno a los 15 segundos se aprecia cómo a medida que aumenta el tiempo, va disminuyendo la posición en y.

BARRA 23



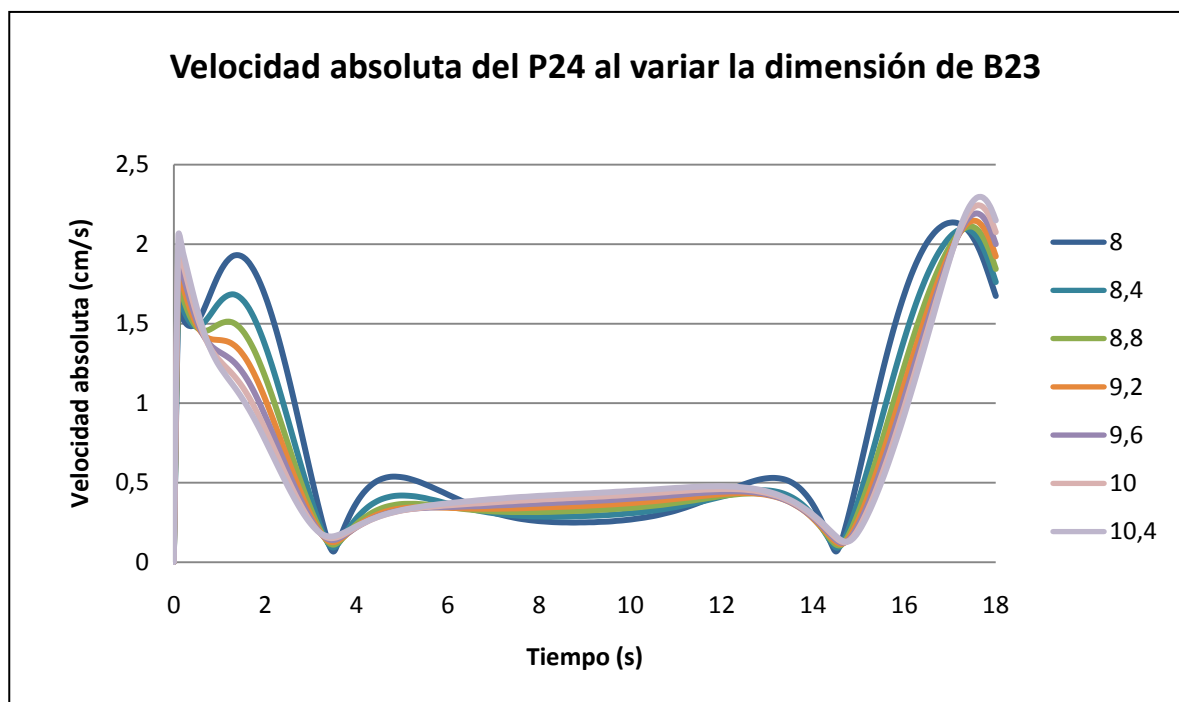
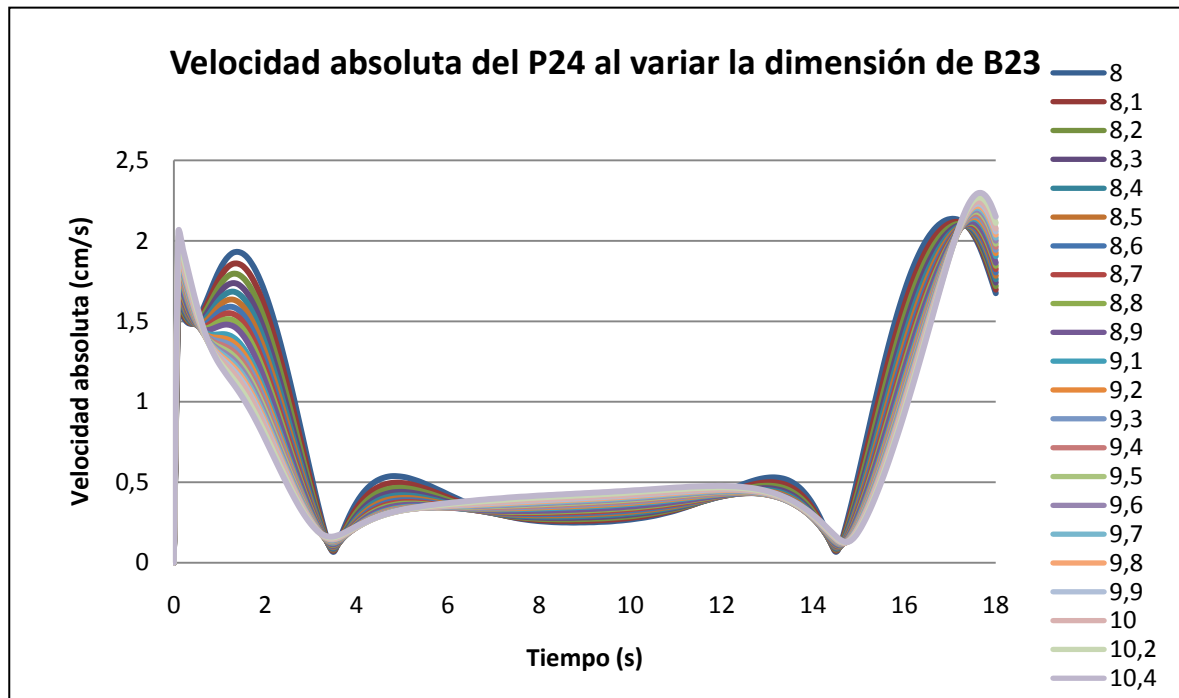
Para menores dimensiones de la barra, la gráfica toma tanto valores máximos relativos como mínimos relativos, quedando la misma para dimensiones mayores a 9,2 cm con unos resultados muy parejos.

BARRA 23



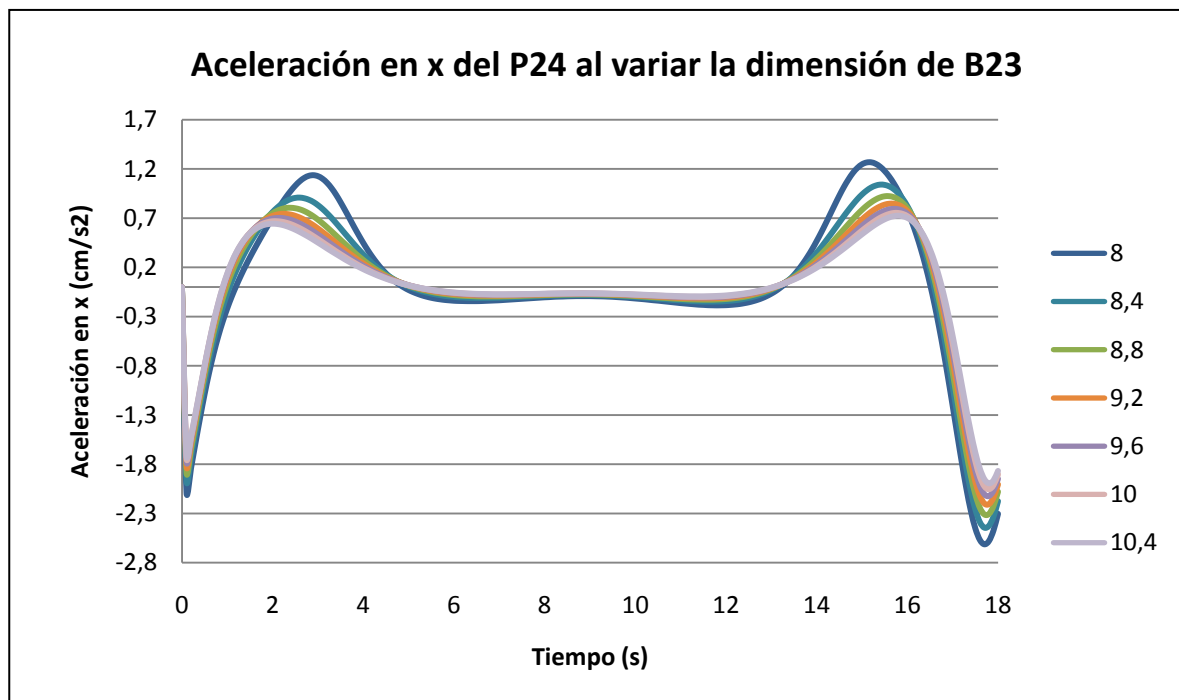
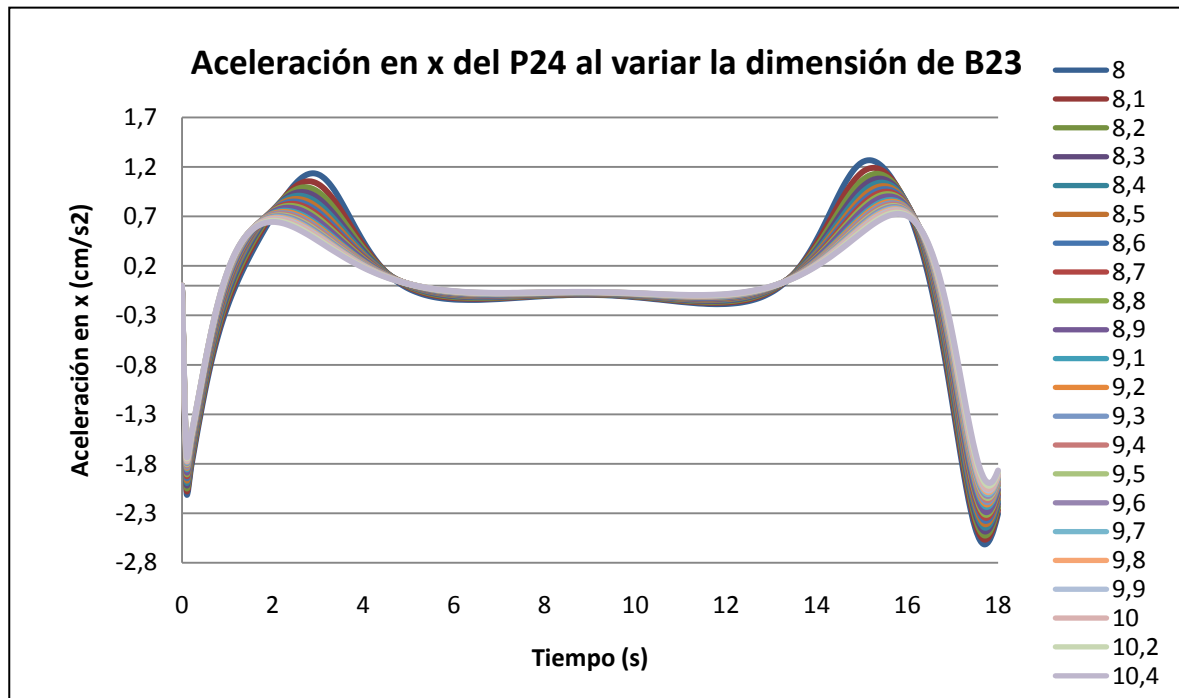
La gráfica se comporta de forma parecida a partir de un tamaño de la barra de 9,2 cm como en el caso anterior. Sin embargo, para un tiempo de 2 segundos, vemos cómo se produce un mínimo relativo en la velocidad.

BARRA 23



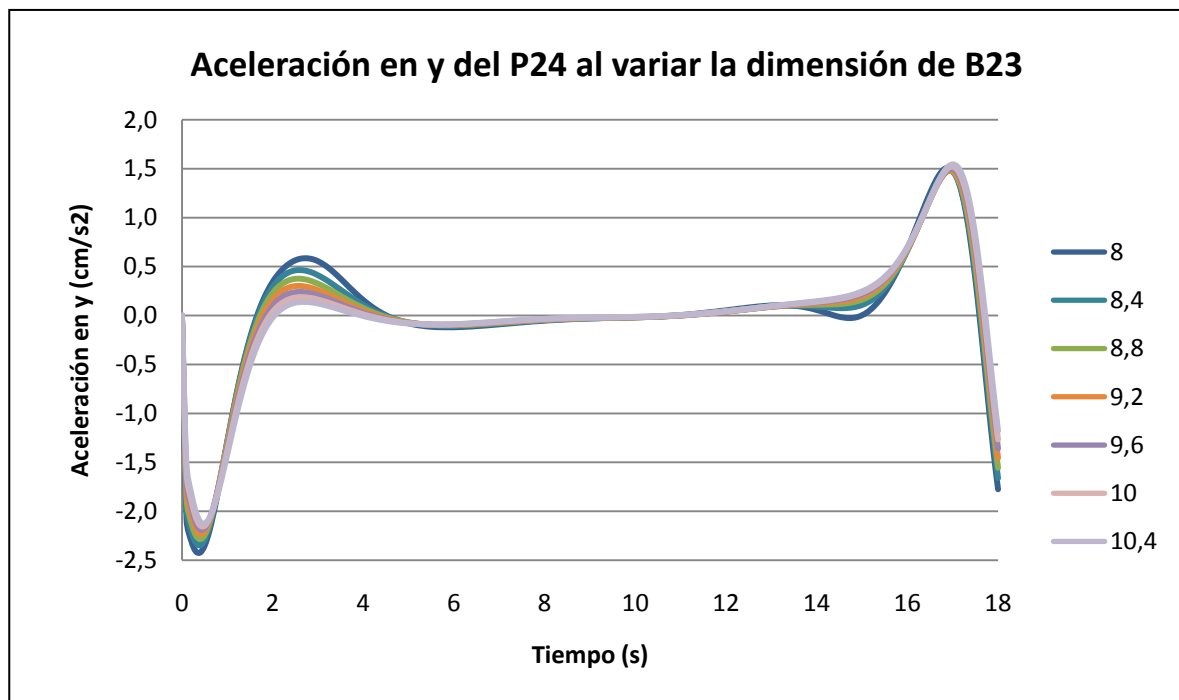
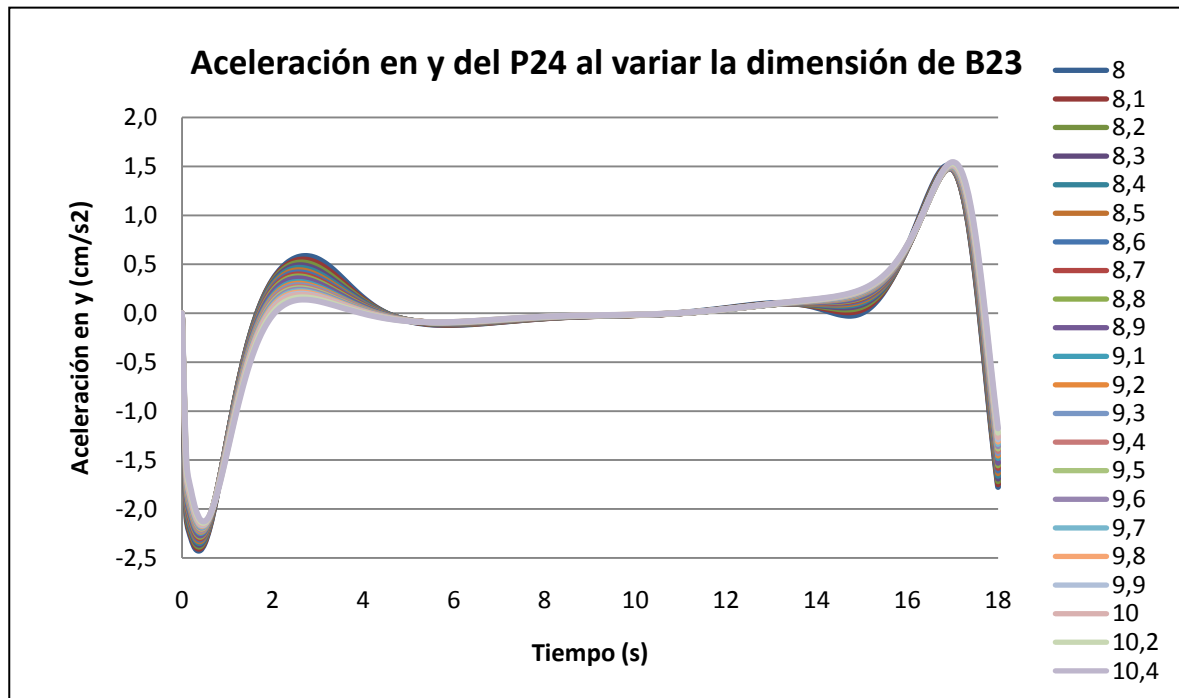
Al igual que en los dos casos anteriores, las velocidades son muy similares para un tamaño de barra mayor a 9,2 cm. Para tamaños más pequeños, las velocidades pueden variar hasta un 50% entre la mayor y la menor de las barras, como ocurre en un tiempo de 2 segundos. Se observa una cierta simetría en un eje de ordenadas para un tiempo de 9 segundos.

BARRA 23



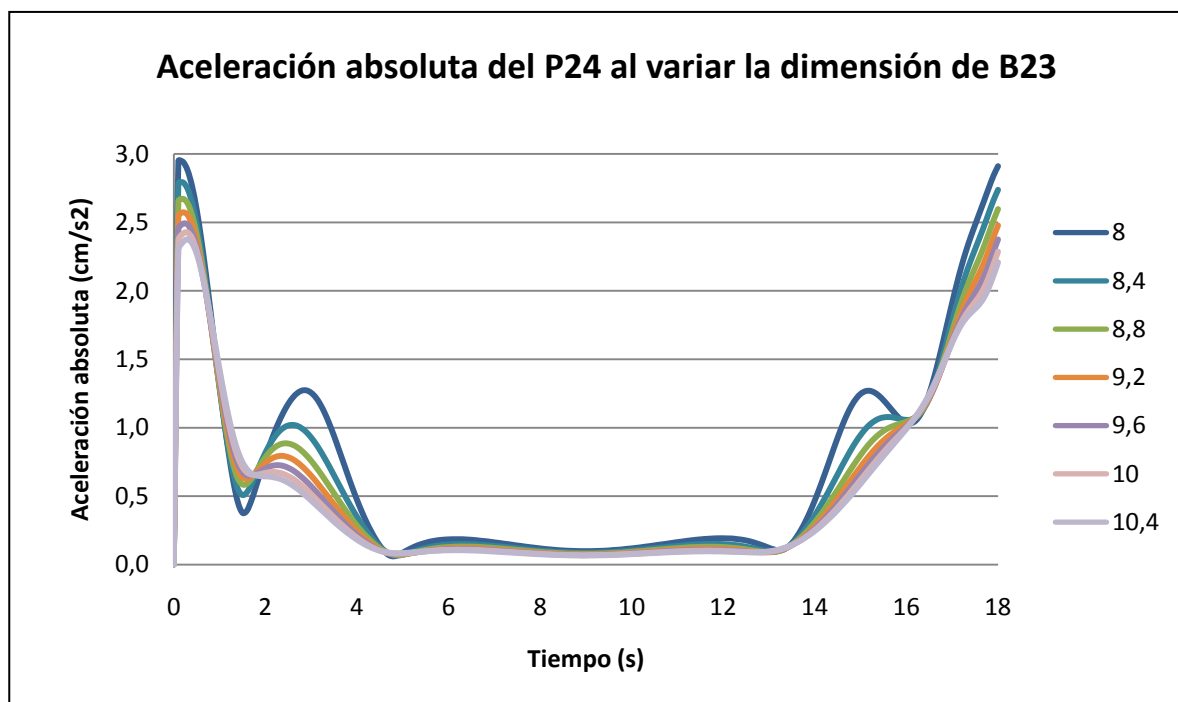
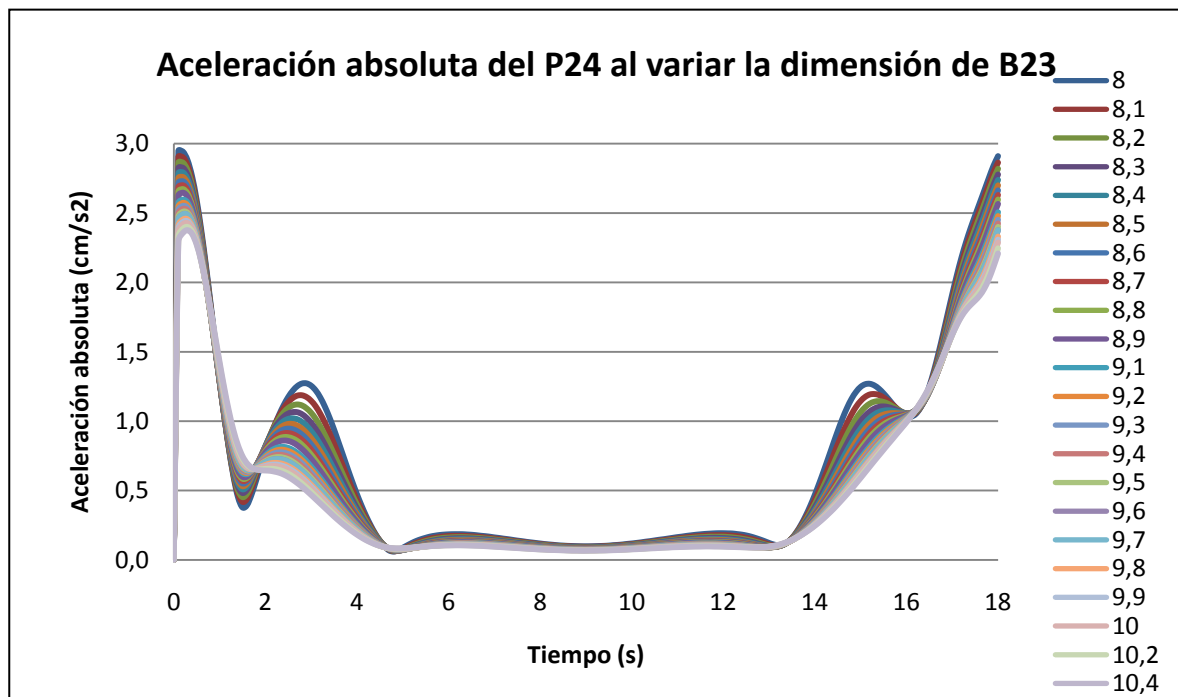
Las aceleraciones obtenidas para los distintos tamaños de barra son muy similares, a excepción de los tiempos 3 y 15 segundos, donde se producen unos máximos ocasionados por el menor tamaño de la barra. Se puede identificar cierta simetría en el eje de ordenadas para un tiempo de 9 segundos aproximadamente.

BARRA 23



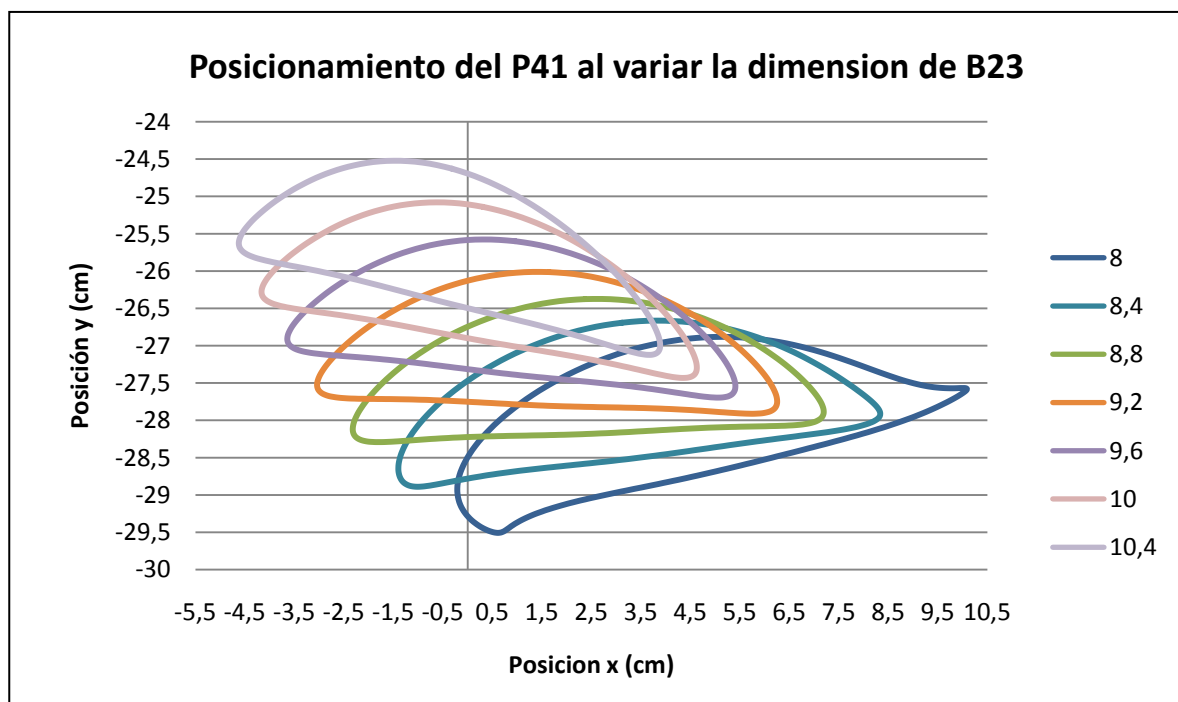
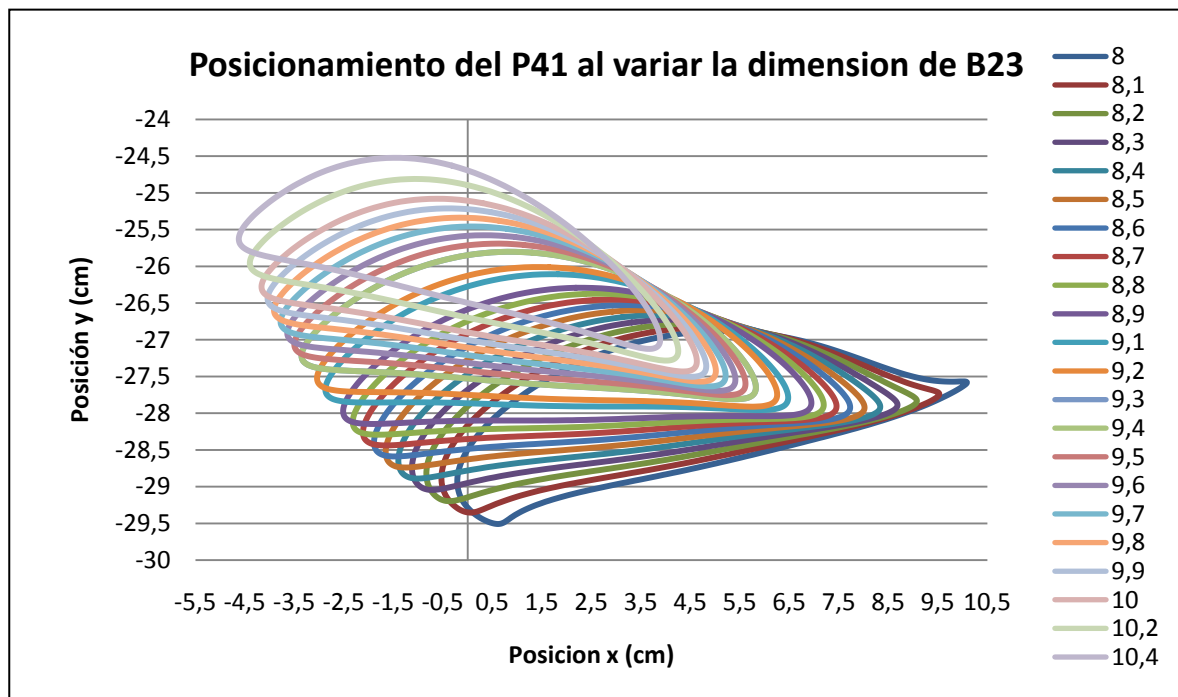
Las aceleraciones obtenidas no representan un cambio notorio al cambiar el tamaño de la barra, a excepción de un tiempo de 3 segundos, donde para un menor tamaño de barra se observa un incremento de hasta $0,6 \text{ cm/s}^2$ entre la menor y la mayor de las barras.

BARRA 23



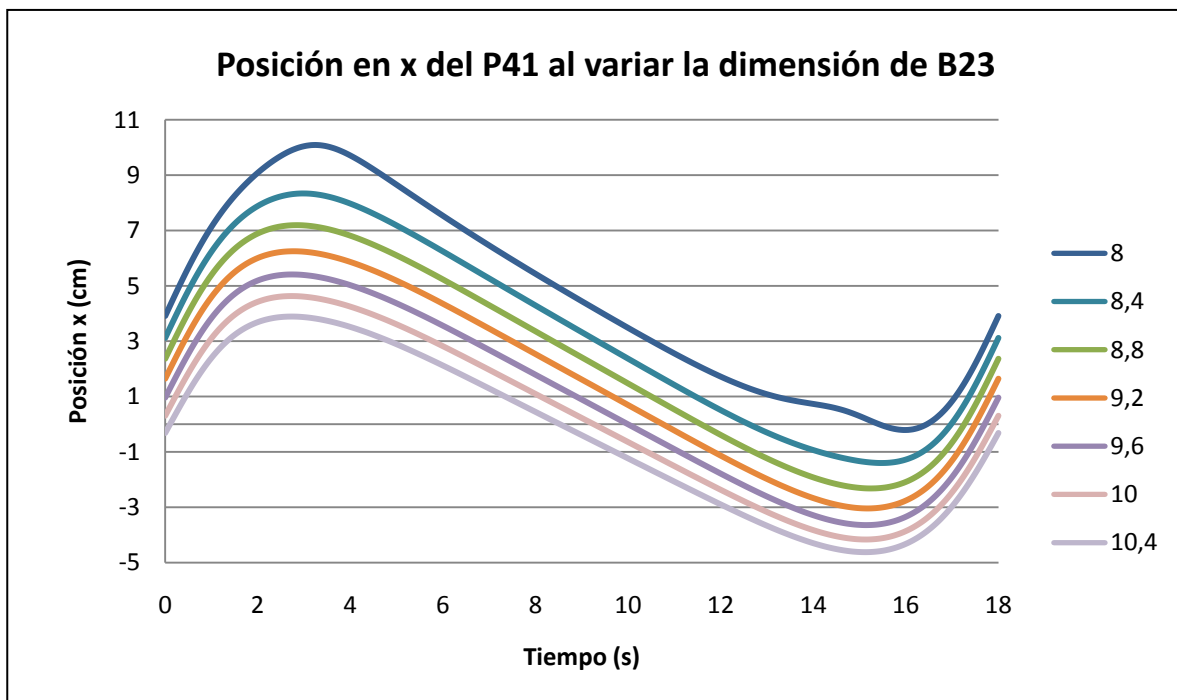
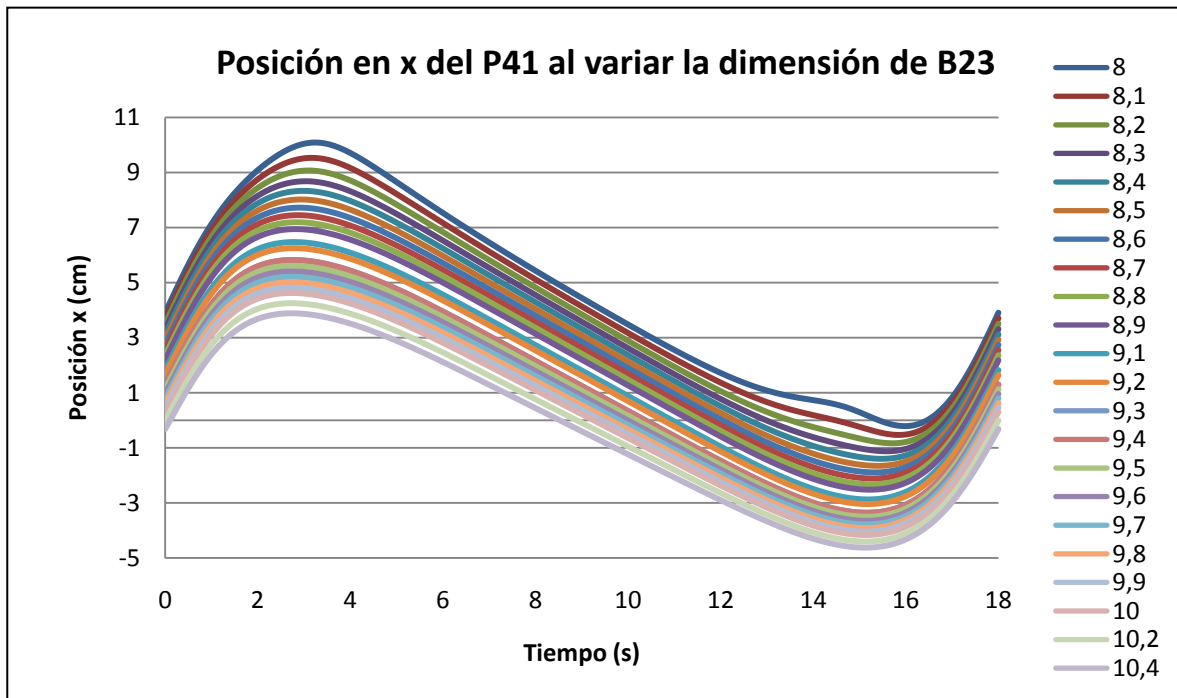
Al igual que en los casos anteriores, las aceleraciones son muy parejas para los distintos tamaños de las barras a excepción de los tiempos iniciales y finales. También se observa una diferencia a destacar para los tiempos de 3 y 15 segundos, donde para unas dimensiones de las barras menores a 9,2 cm, se aprecian máximos relativos en las aceleraciones.

BARRA 23



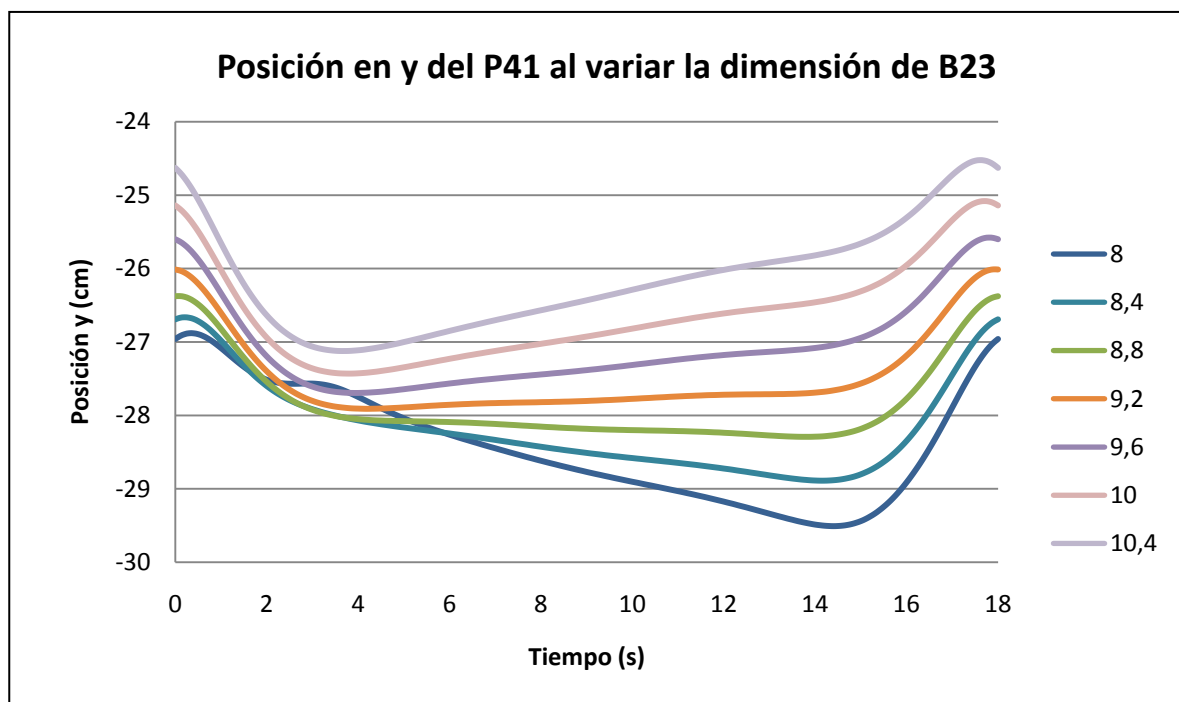
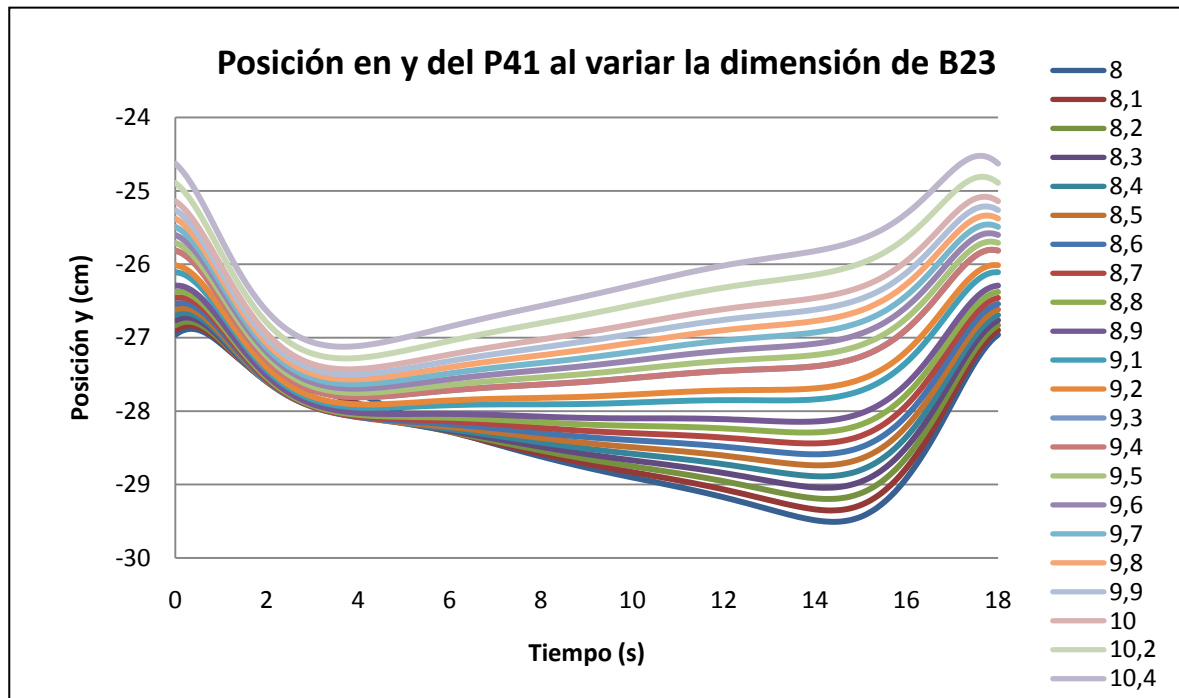
En este tipo de gráficas, quedan representadas las trayectorias que siguen las distintas barras en función de los distintos ejes. Para menores dimensiones de barra, el punto 41 recorre mayores distancias. A medida que se disminuye el tamaño de la barra aumentamos la distancia recorrida, incluso se ve cómo esta disminución se puede tratar como proporcional. Para el tamaño de 8 cm se producen picos en la gráfica.

BARRA 23



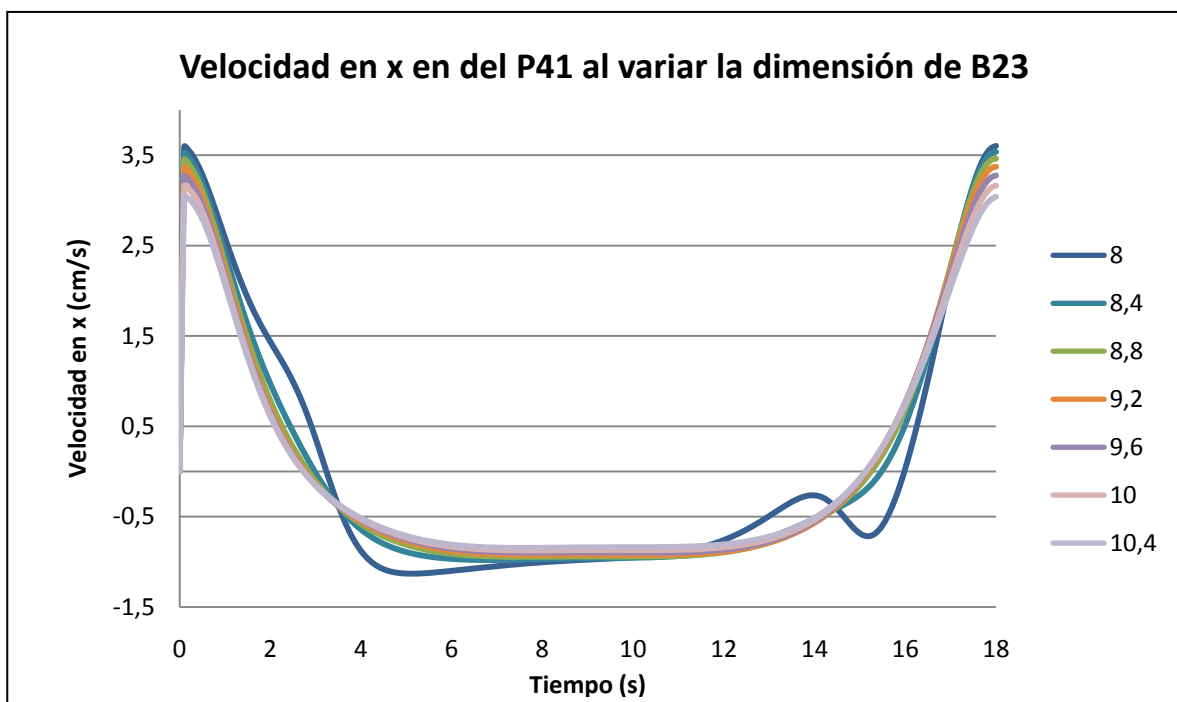
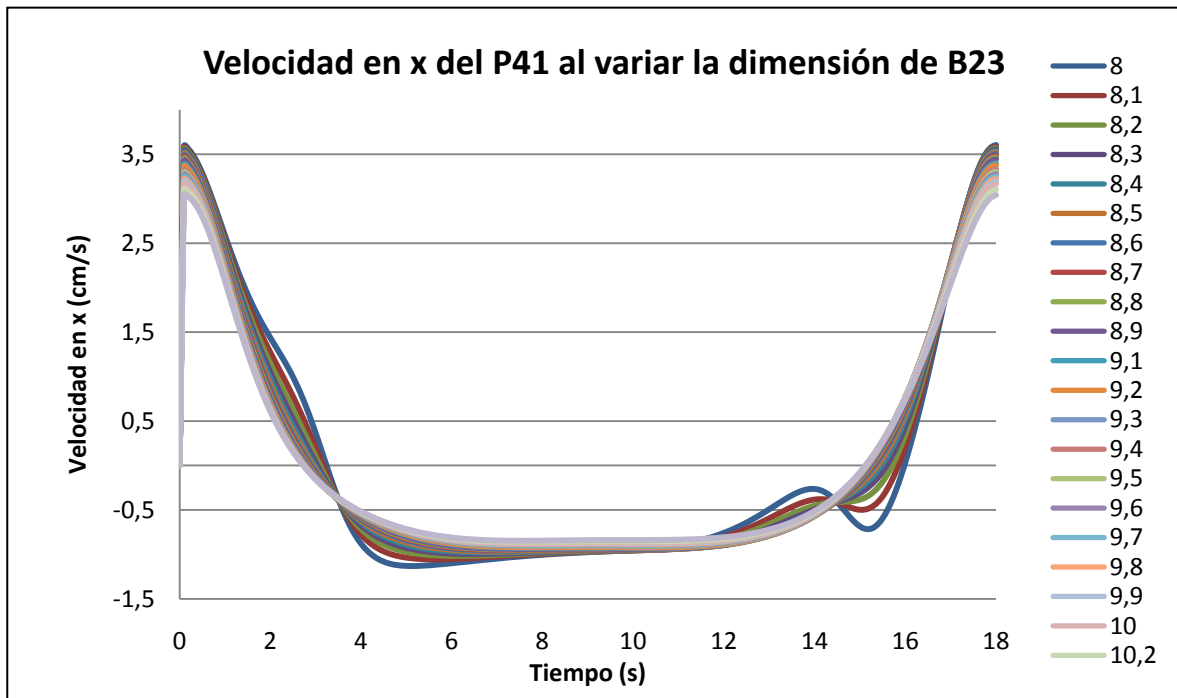
A mayor tamaño de la barra, hay una menor posición en x. La diferencia entre las barras a medida que avanza el tiempo es constante en cuanto a la posición en x, excepto para la barra de menor tamaño, donde se produce una alteración para un tiempo de 15 segundos.

BARRA 23



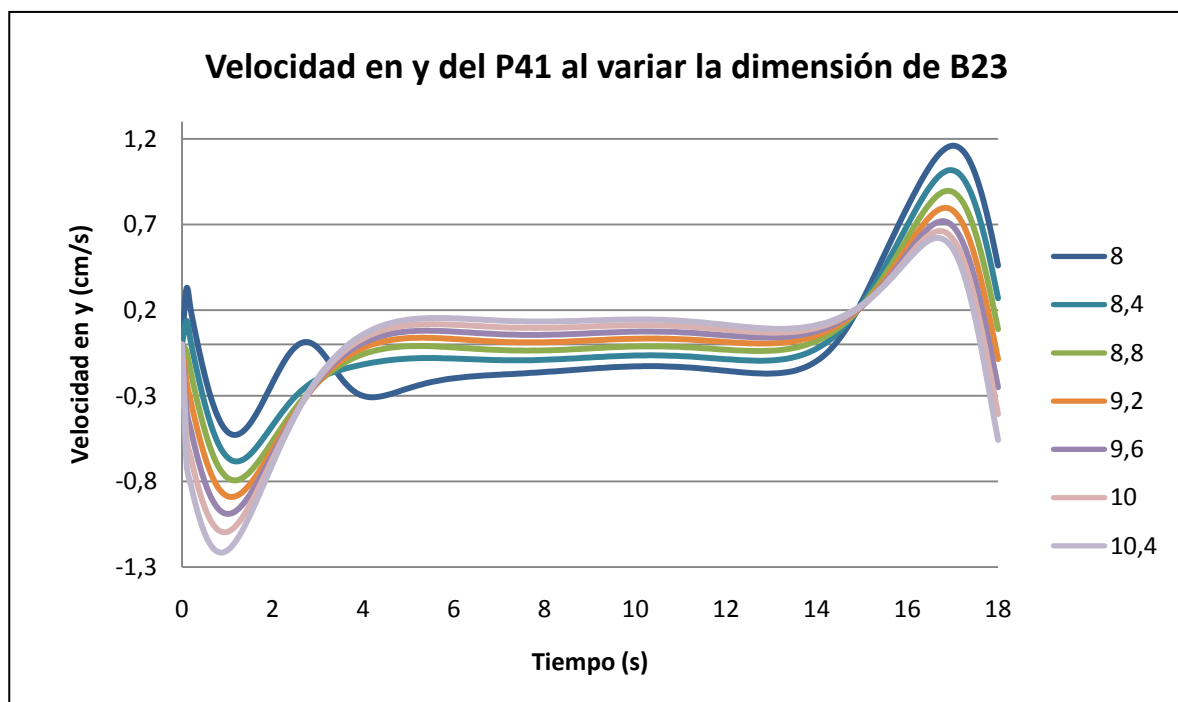
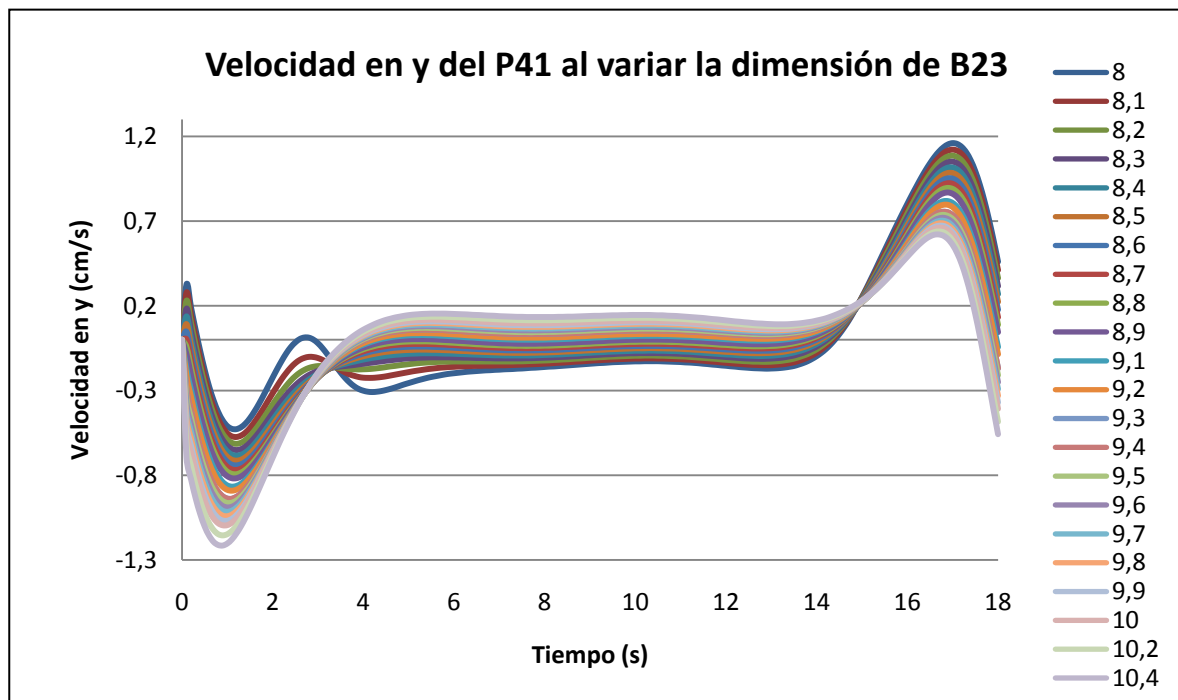
A mayor dimensión de la barra, se obtiene una menor posición en el eje y. Para una dimensión menor a 8.8 cm, la gráfica evoluciona de forma distinta, no siguiendo el patrón tomado por los tamaños de barra mayores.

BARRA 23



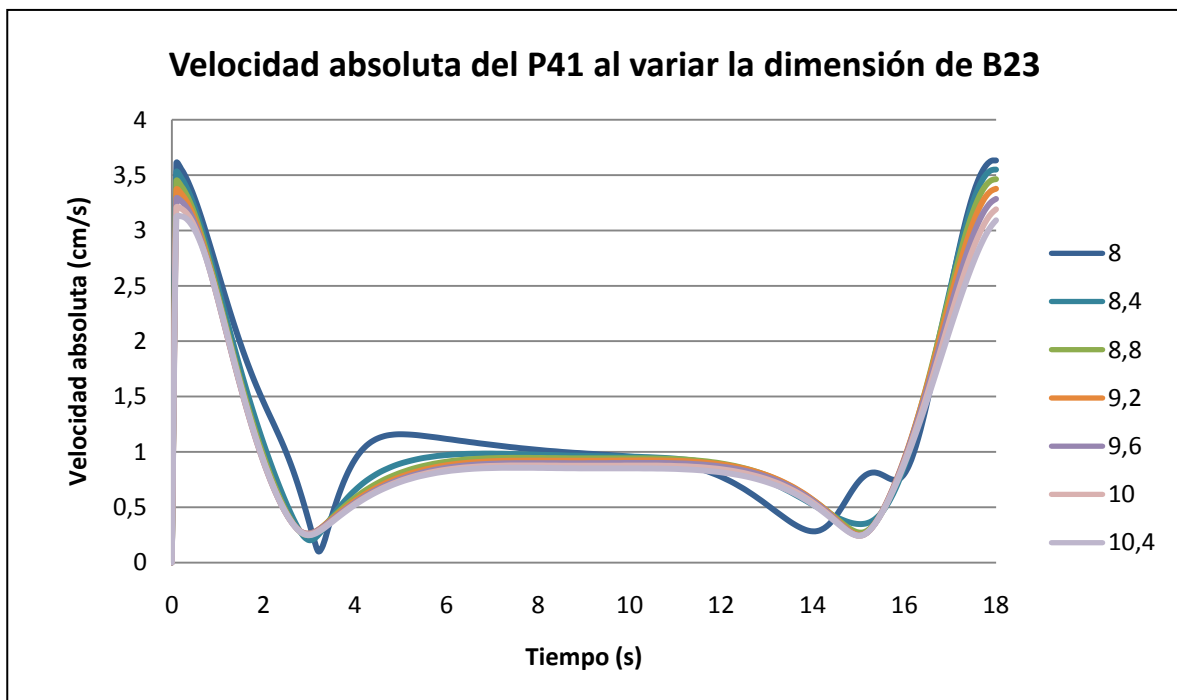
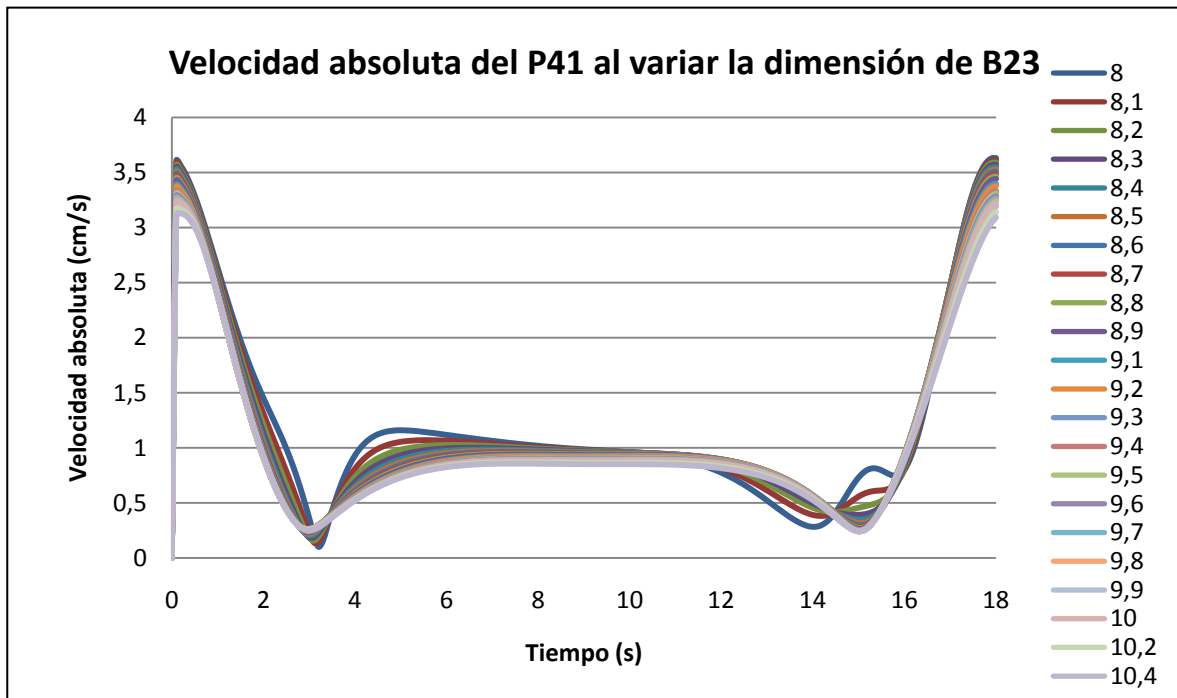
Para las distintos tamaños de barra, se obtiene prácticamente la misma velocidad en x, excepto para la barra de menor tamaño, que tiene un comportamiento diferente al resto.

BARRA 23



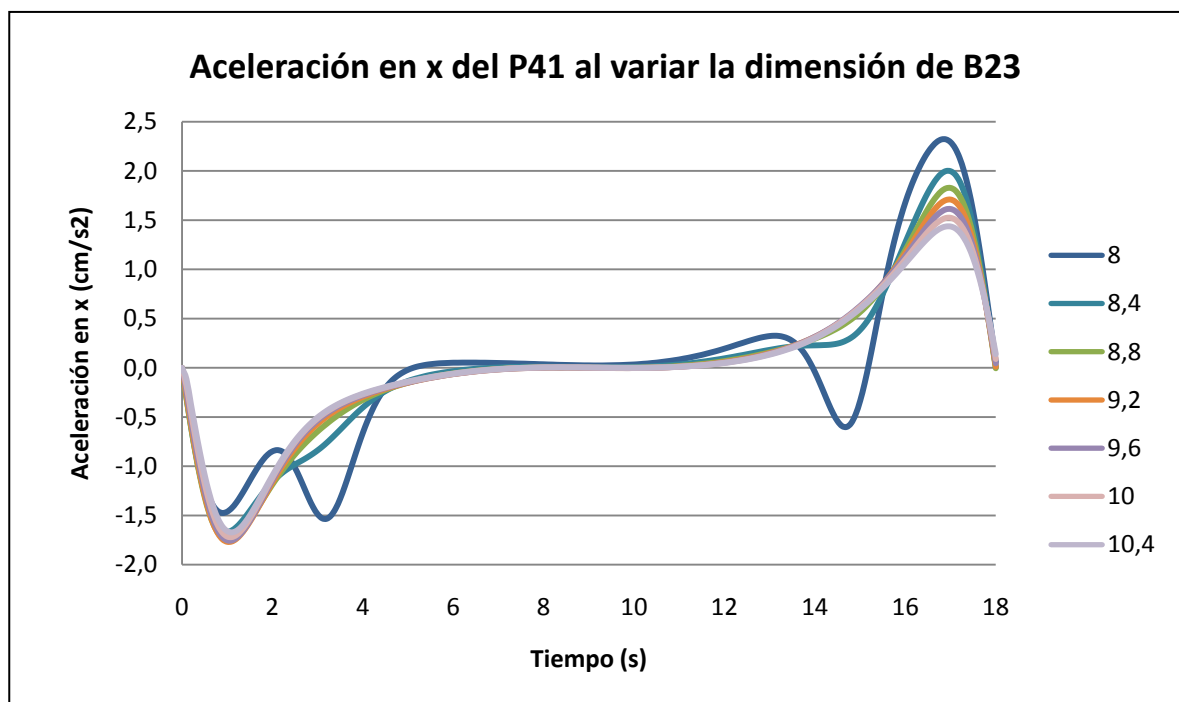
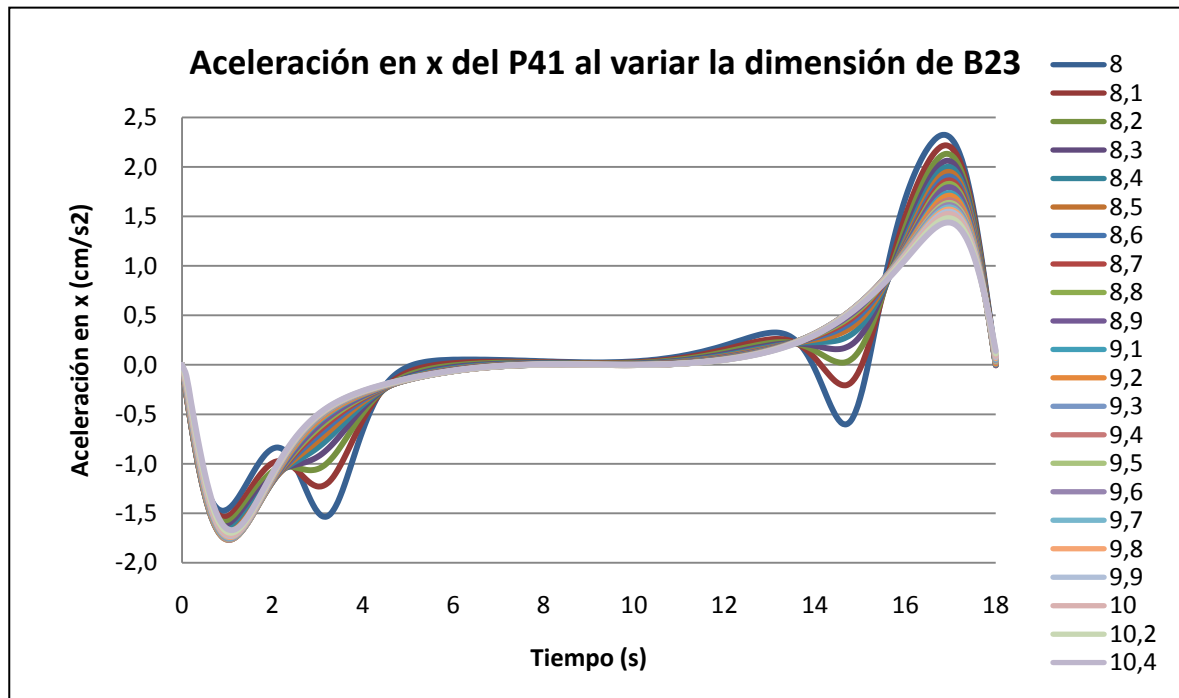
En esta ocasión, para la barra de menor tamaño las velocidades no siguen la misma disposición gráfica que el resto, dando lugar a un máximo y un mínimo relativo en el intervalo [2,6] segundos. Se aprecia también cómo en 1 segundo, a medida que aumenta la dimensión de la barra aumenta la velocidad, mientras que en el instante 17 segundos pasa justamente al contrario, ahora a menor dimensión de la barra, mayor velocidad.

BARRA 23



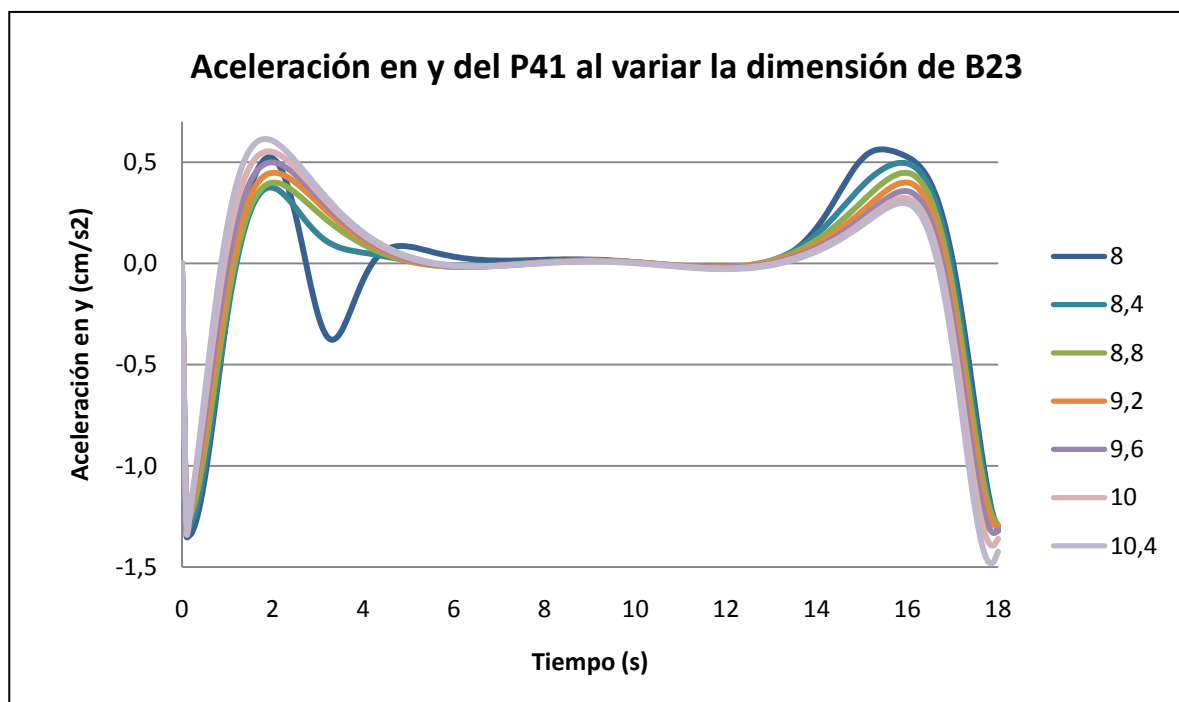
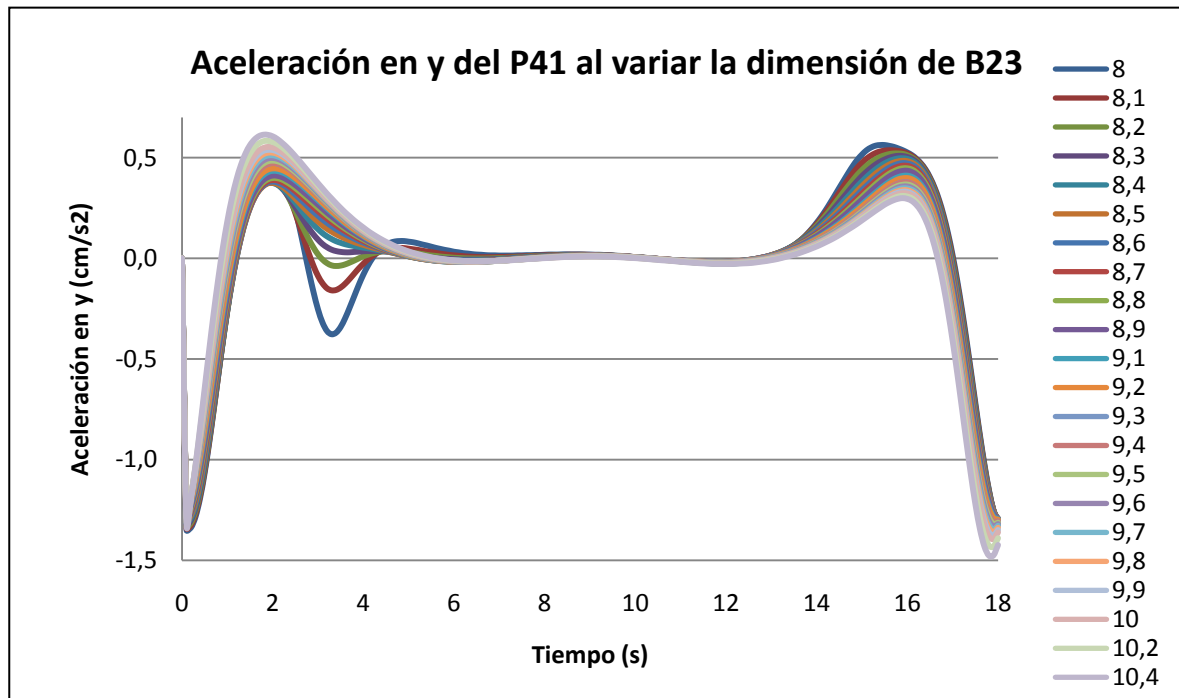
Las velocidades para las distintas barras son muy similares, a excepción de las barras de menor tamaño, en las que se puede apreciar un comportamiento diferente al resto. Obviando el comportamiento de estas barras, hay cierta simetría en el eje de ordenadas en 9 segundos.

BARRA 23



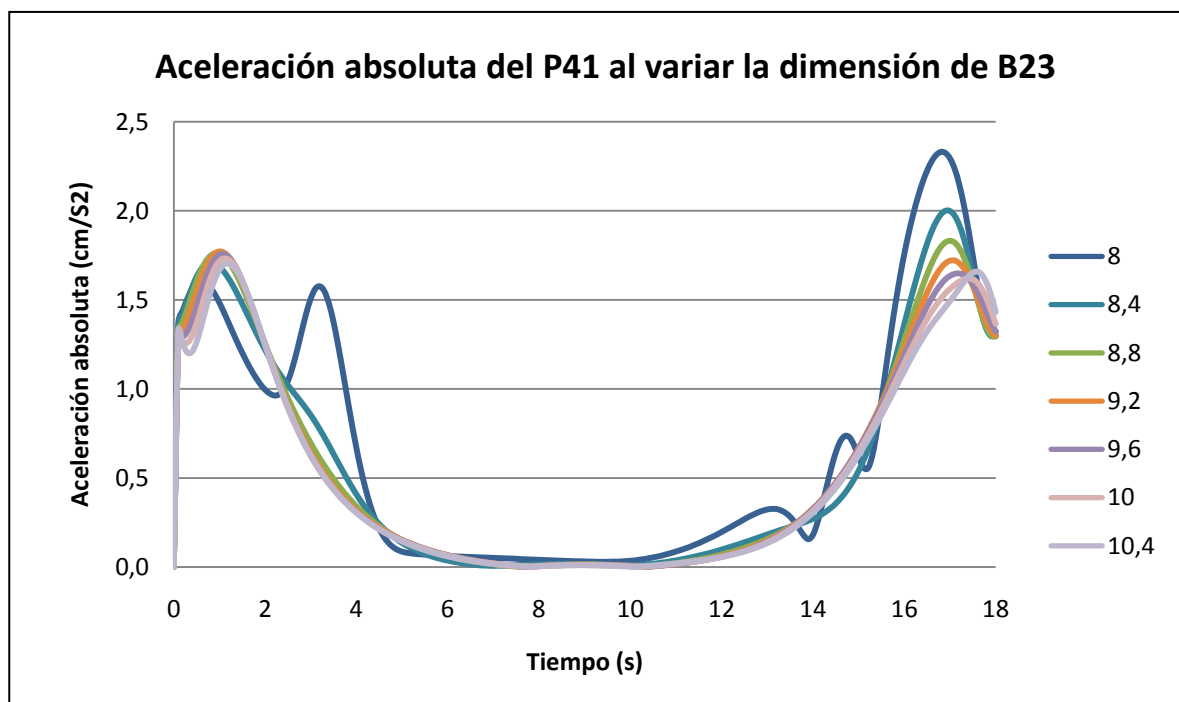
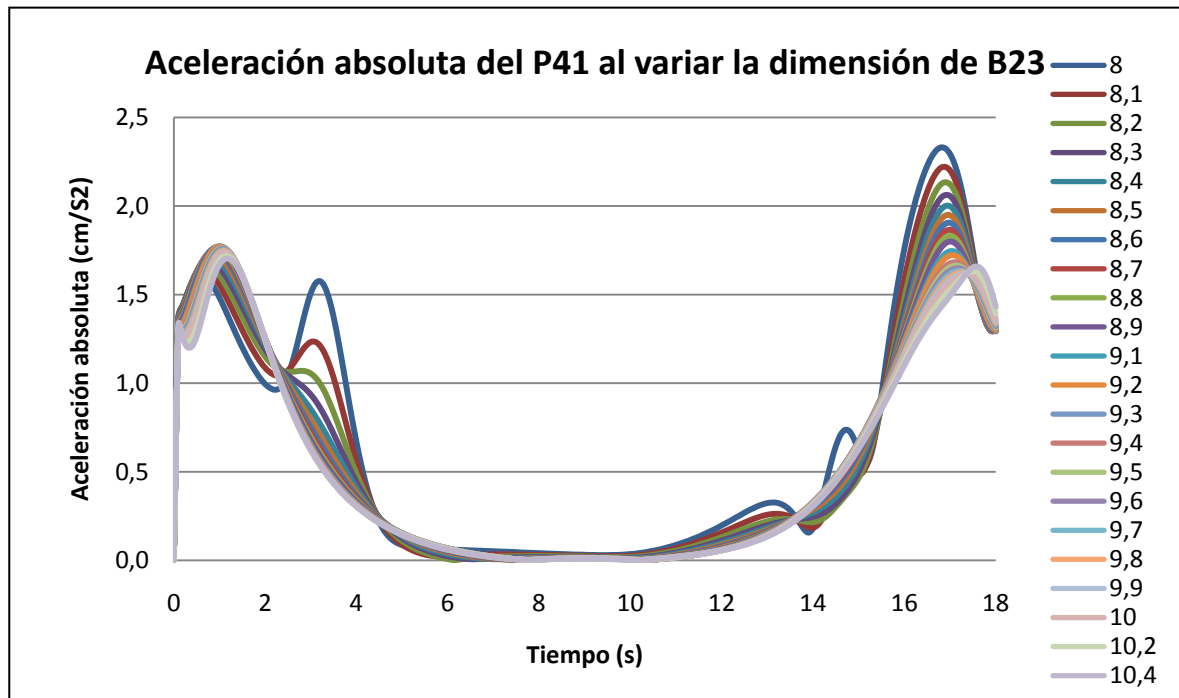
Aceleración similar para las distintas barras, excepto las que tienen una dimensión menor a 8,4 cm aproximadamente, produciendo estas últimas mínimos relativos en 3 y 15 segundos y máximo relativo en 2 segundos. Se produce un máximo absoluto en 17 segundos, en el que a menor dimensión de la barra se cuenta con una mayor aceleración.

BARRA 23



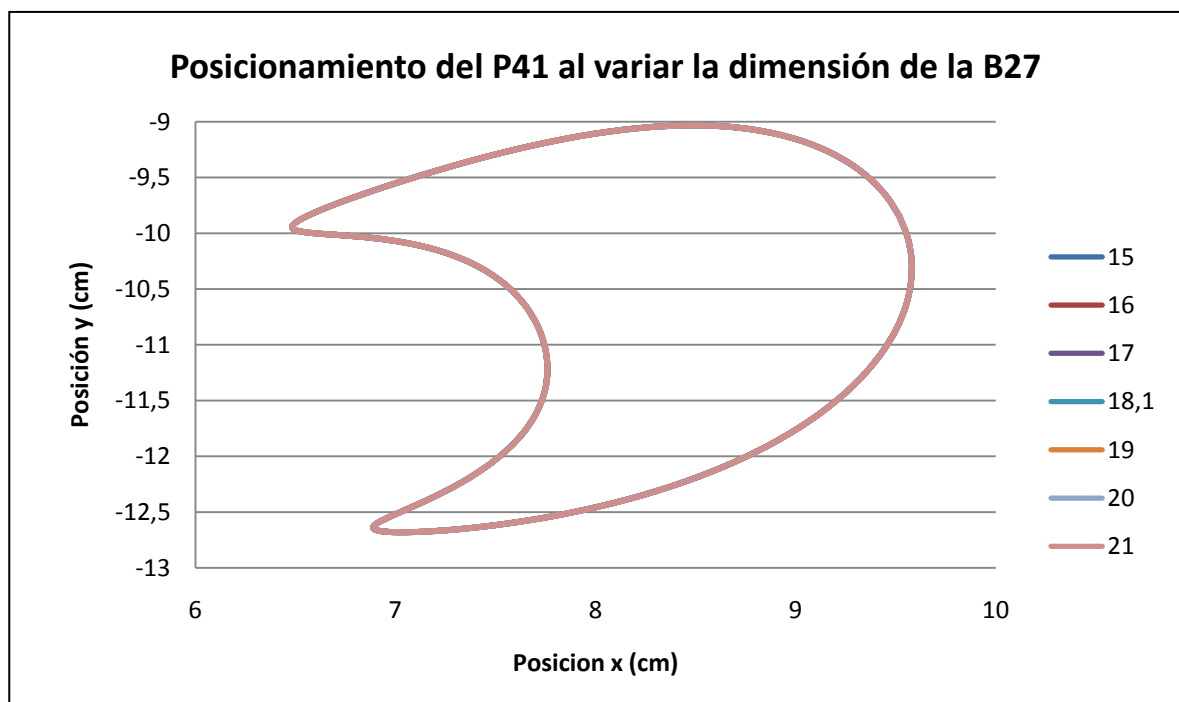
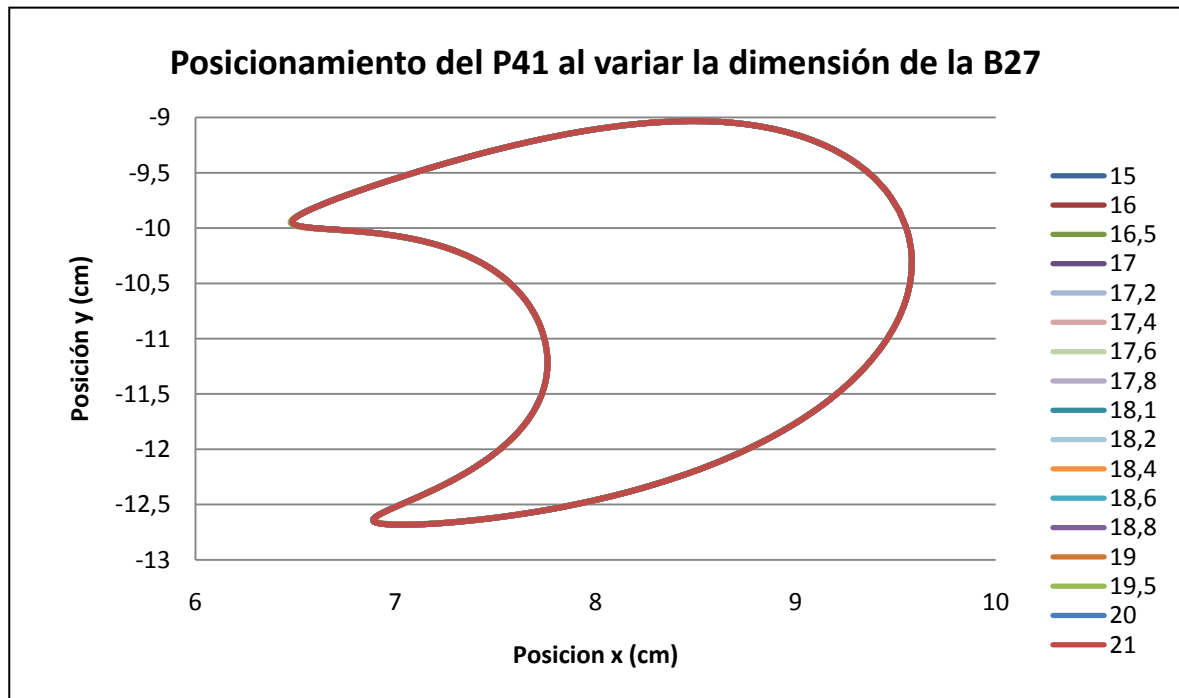
Acercaciones similares para todas las barras excepto las que tienen una dimensión menor a 8,4 cm. Se producen dos máximos, uno en 2 segundos y otro en 15 segundos. En el primero a mayor dimensión de la barra, mayor aceleración; mientras que en el segundo ocurre justo al contrario, a menor dimensión de la barra, mayor aceleración.

BARRA 23



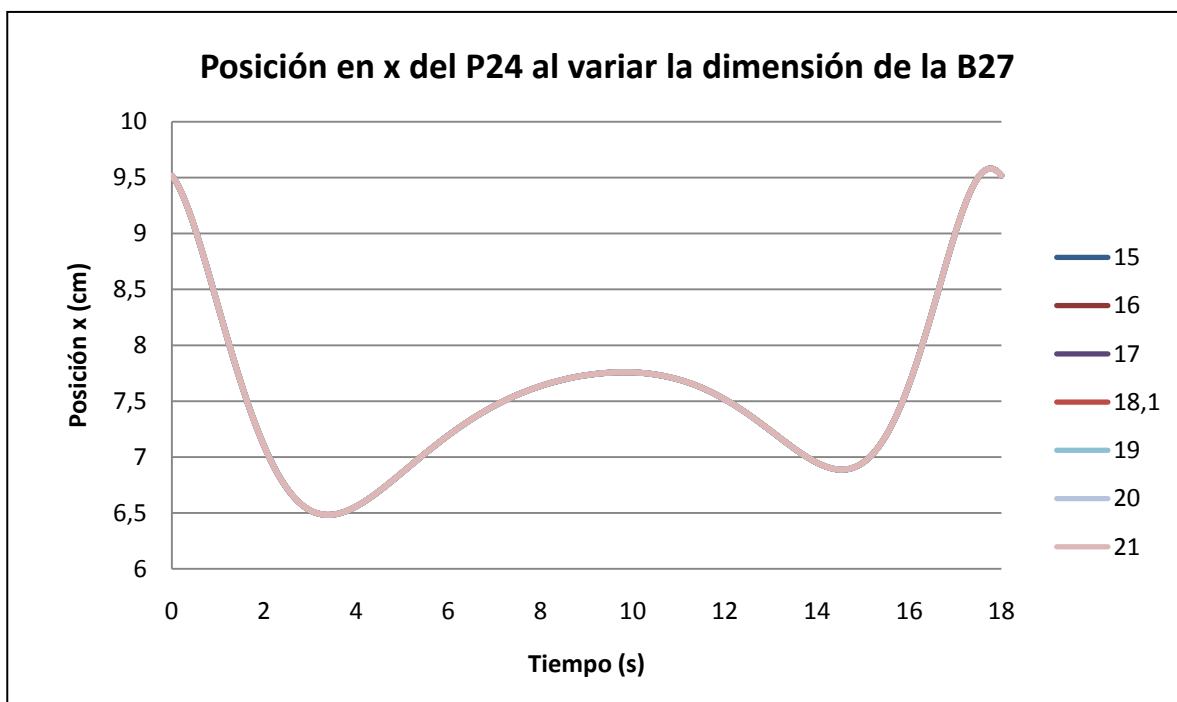
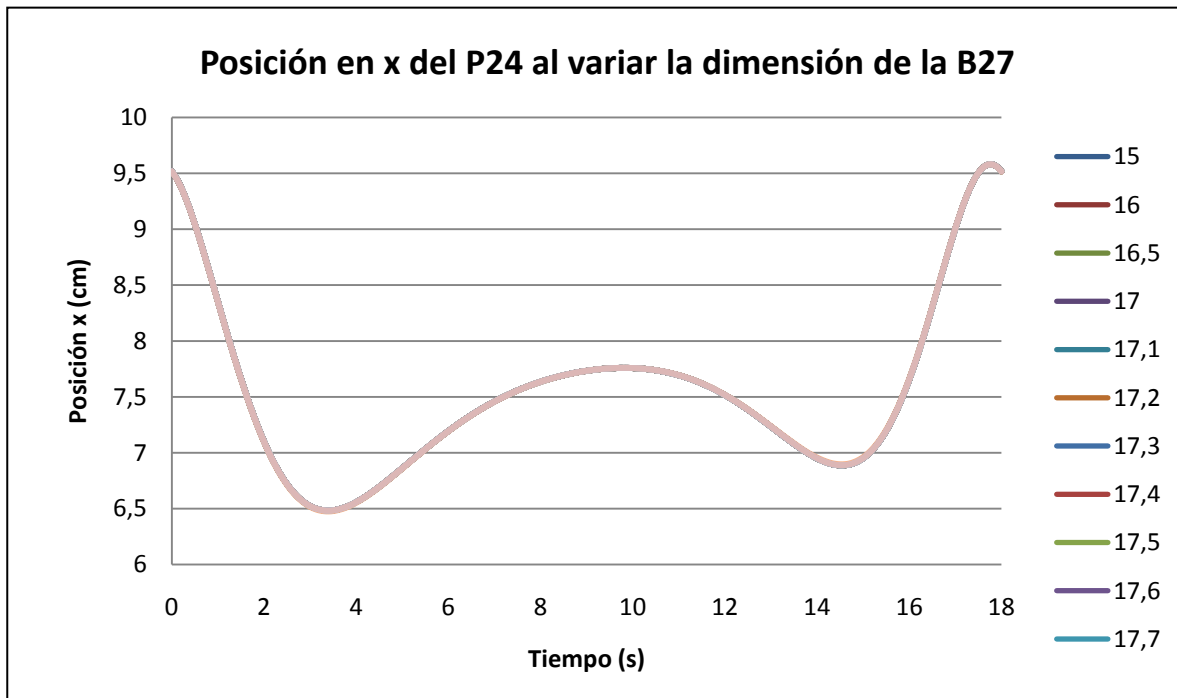
Aceleraciones absolutas prácticamente iguales para todas las barras excepto a las que tienen una dimensión menor a 8,8 cm, aproximadamente. También hay una variación notoria en el intervalo [16,18] segundos, en el que se puede apreciar que a menor tamaño de la barra se obtiene una aceleración absoluta mayor.

BARRA 27



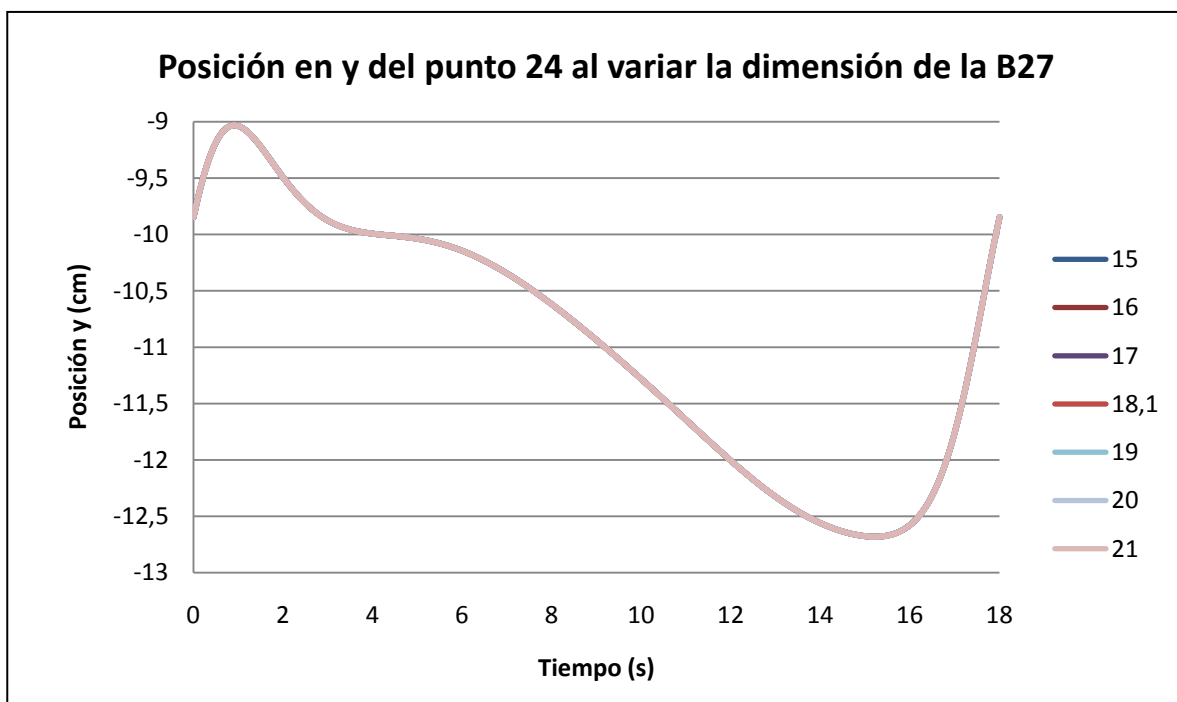
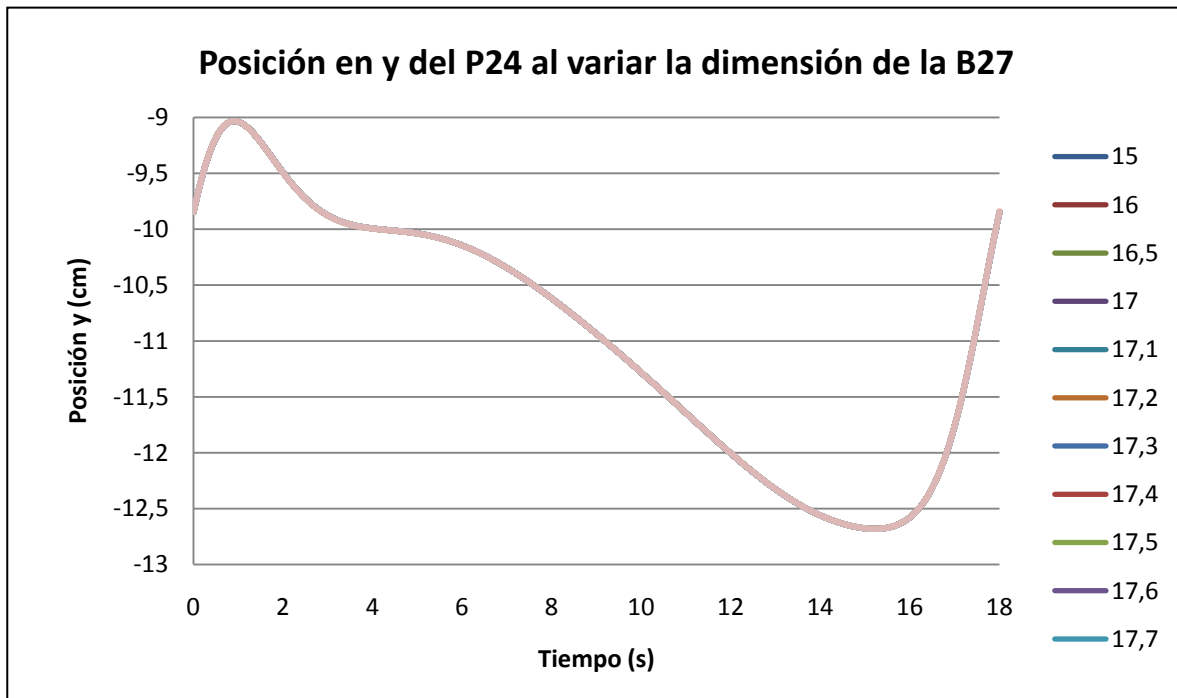
La trayectoria que describe el punto respecto a los ejes de ordenadas y de abscisas es la misma para todas las barras.

BARRA 27



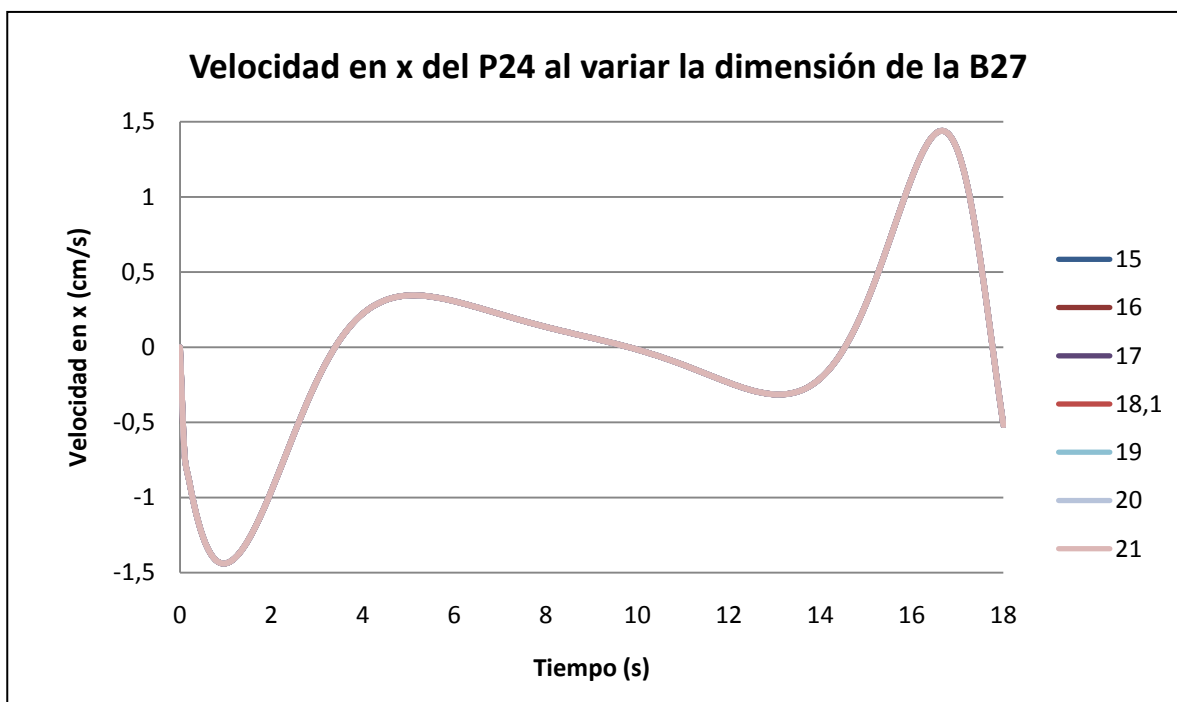
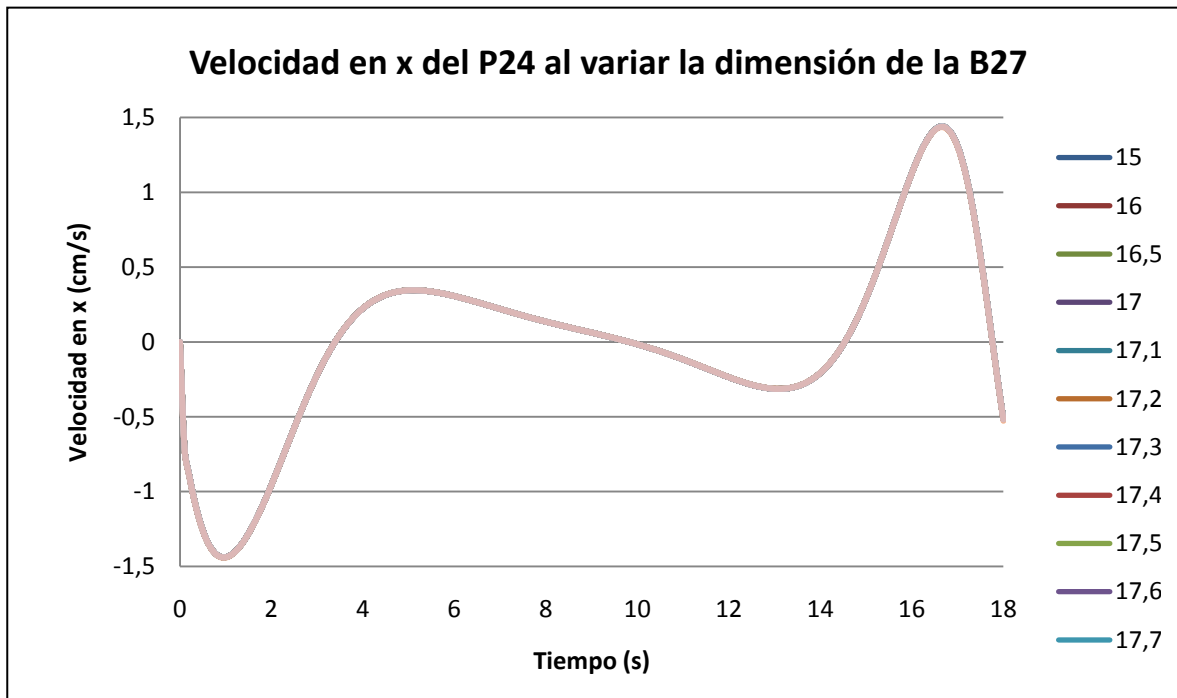
La posición en el eje de abscisas que describe el punto respecto al tiempo es la misma para todas las barras, independientemente de su tamaño.

BARRA 27



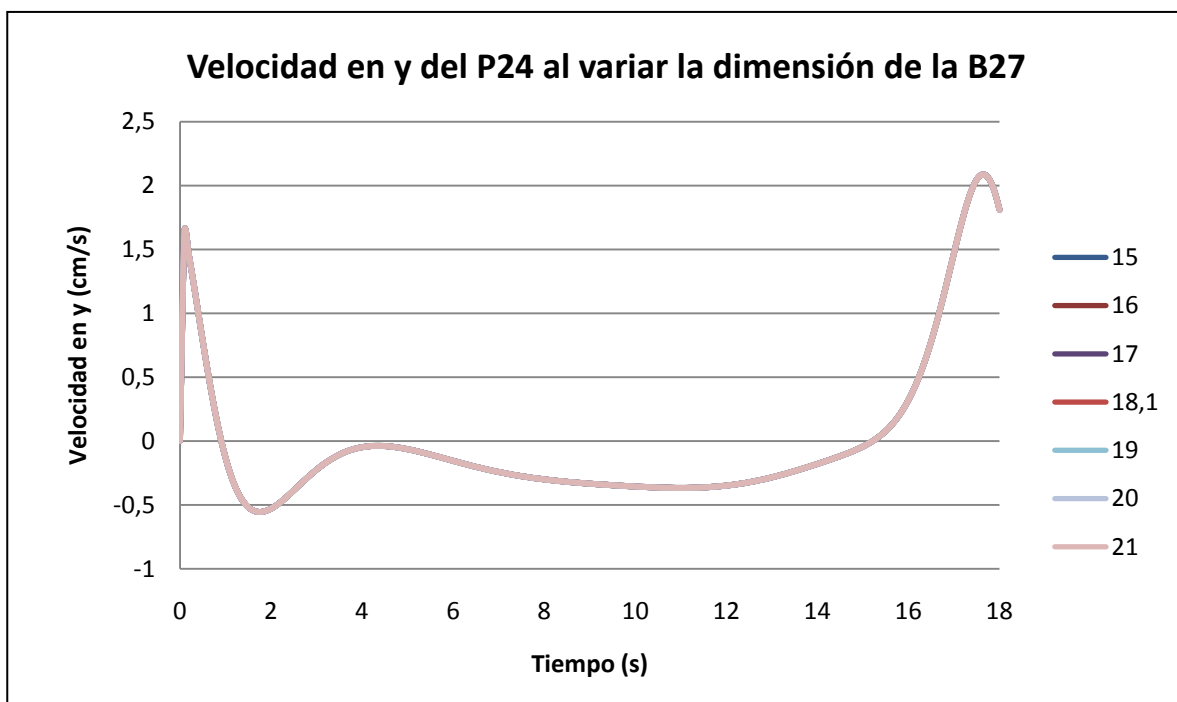
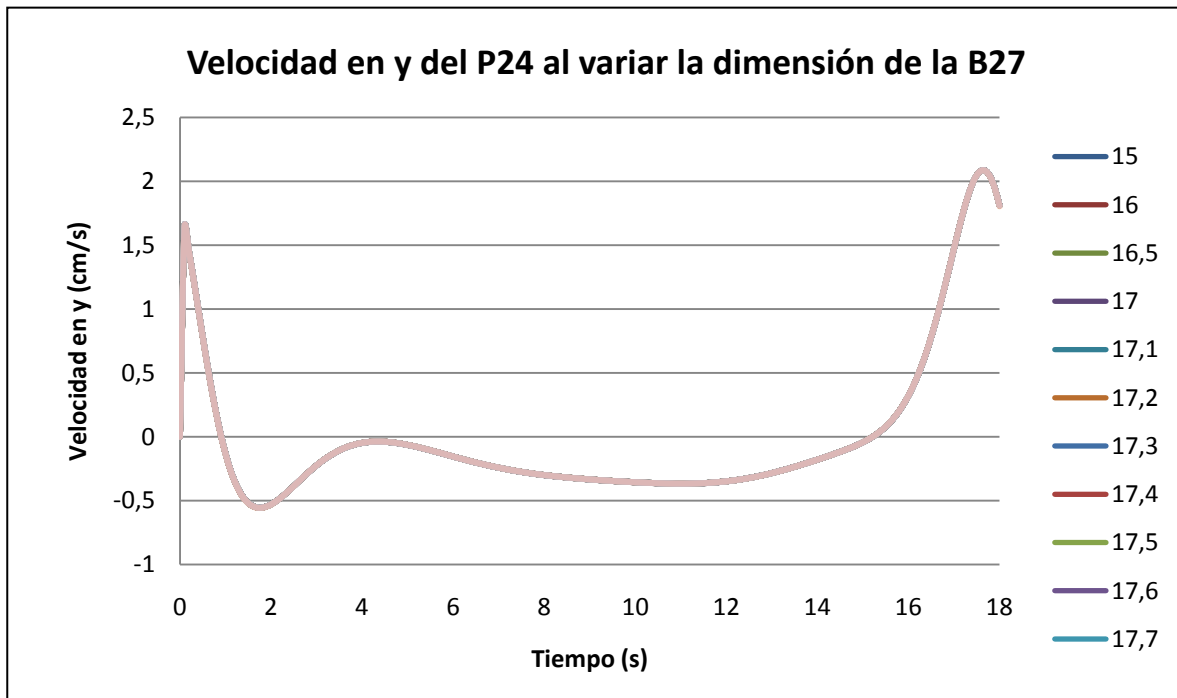
La posición en el eje de ordenadas que describe el punto respecto al tiempo es la misma para todas las barras, independientemente de su tamaño.

BARRA 27



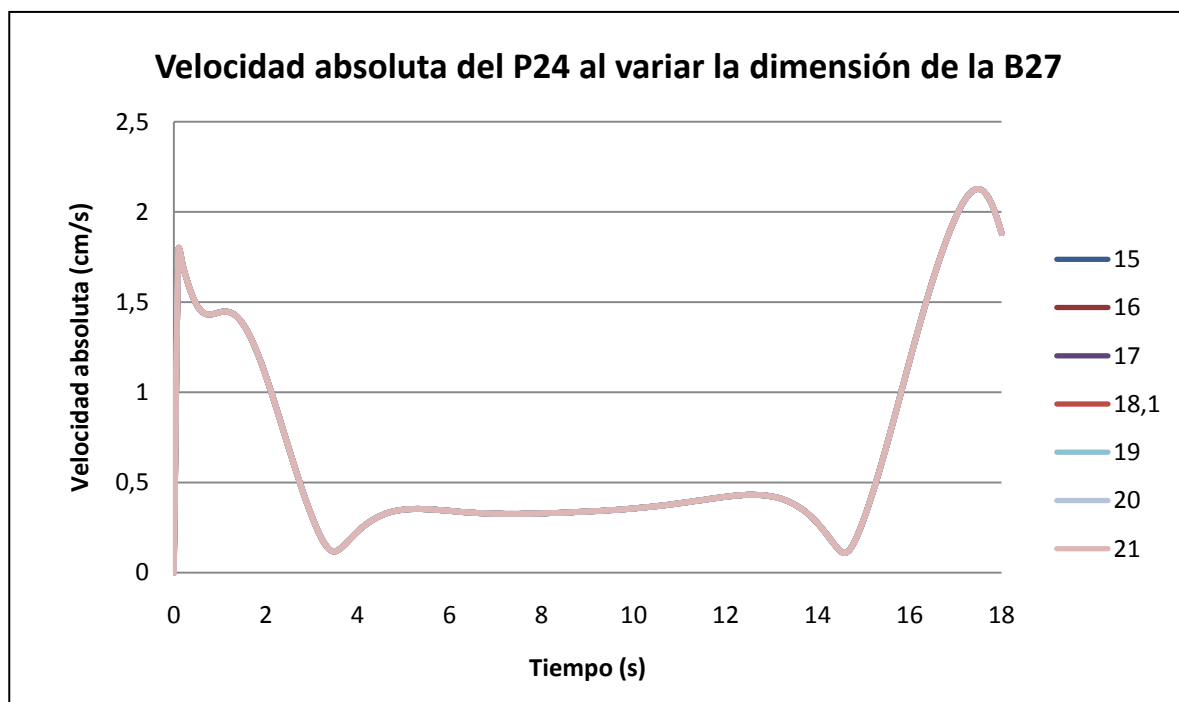
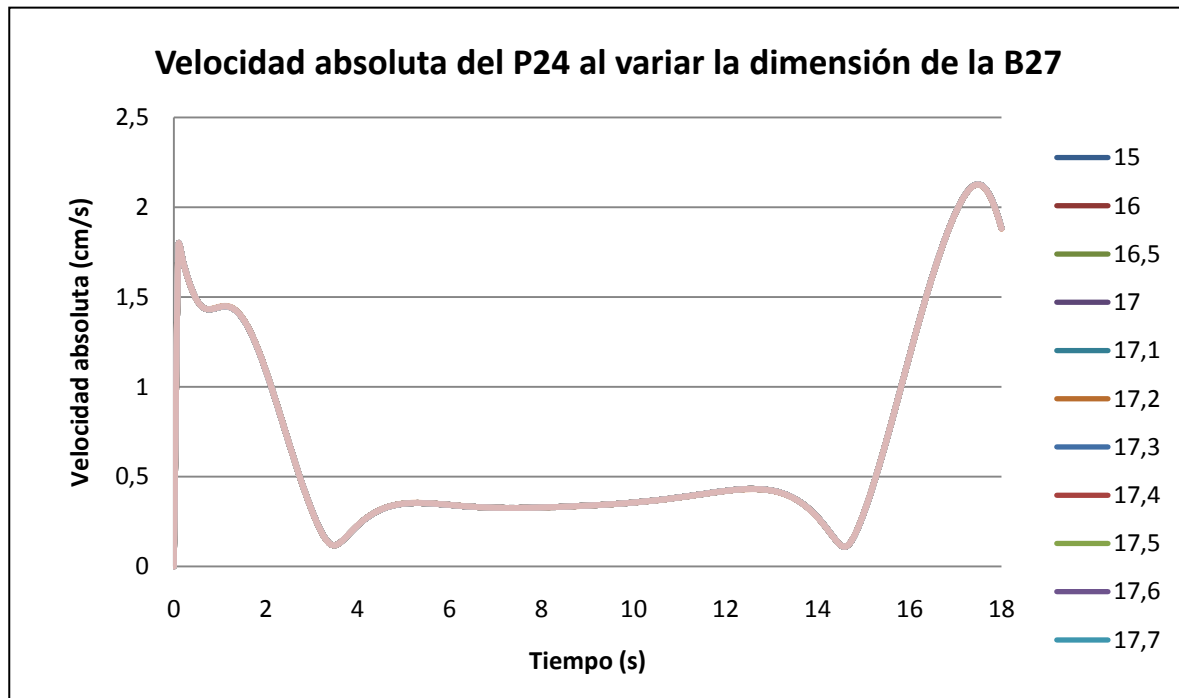
La velocidad en el eje de abscisas que describe el punto respecto al tiempo es la misma para todas las barras, independientemente de su tamaño.

BARRA 27



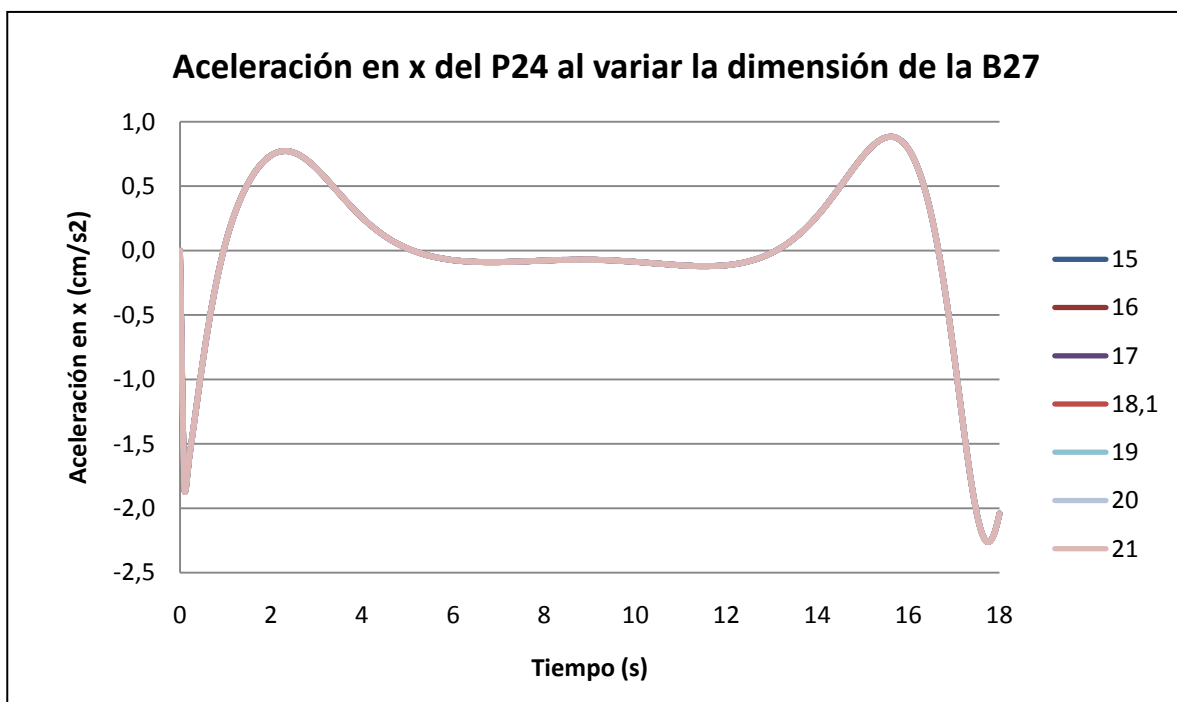
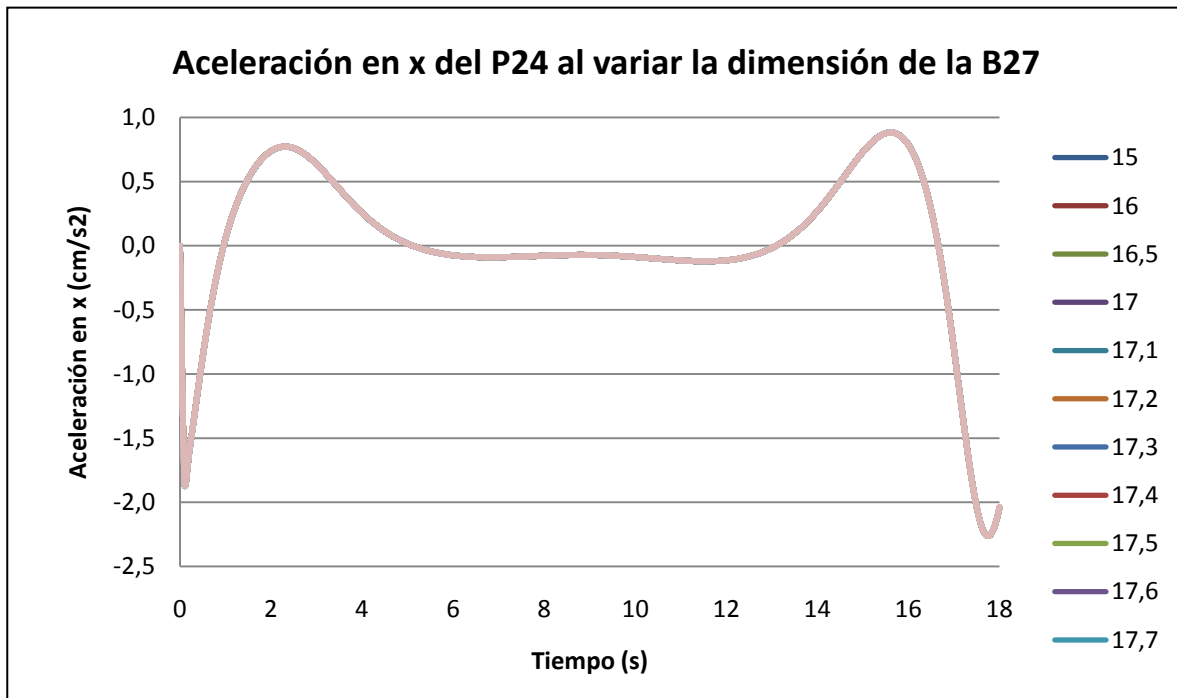
La velocidad en el eje de ordenadas que describe el punto respecto al tiempo es la misma para todas las barras, independientemente de su tamaño.

BARRA 27



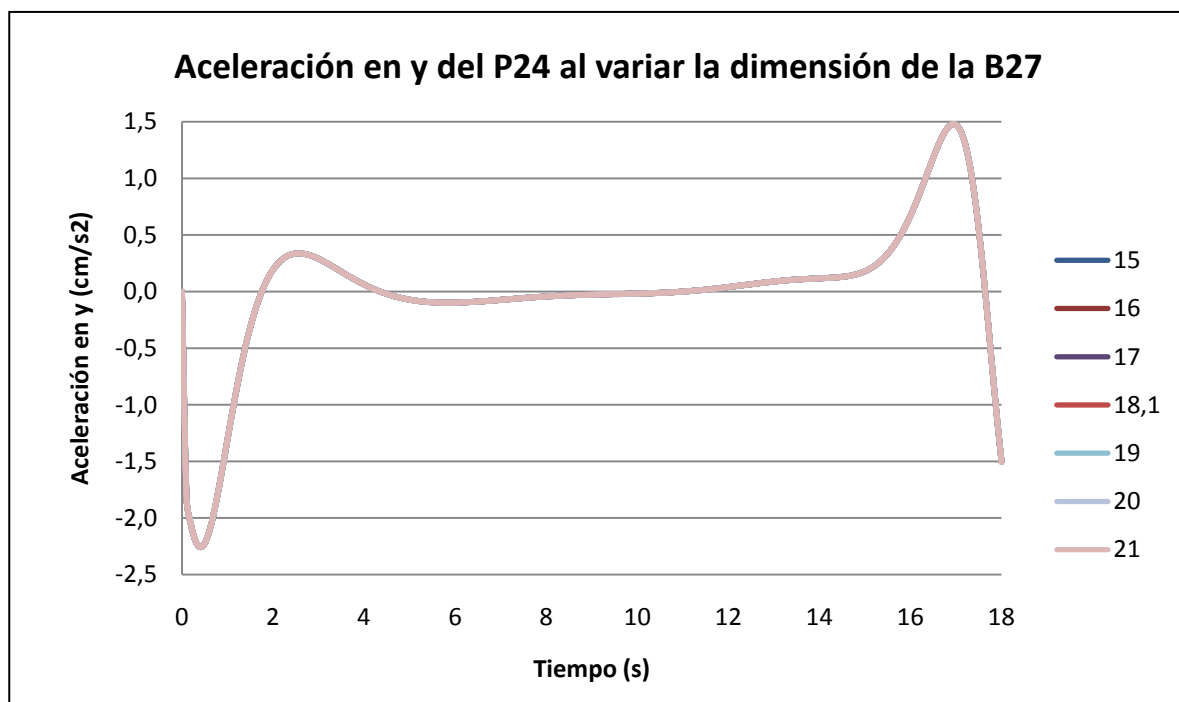
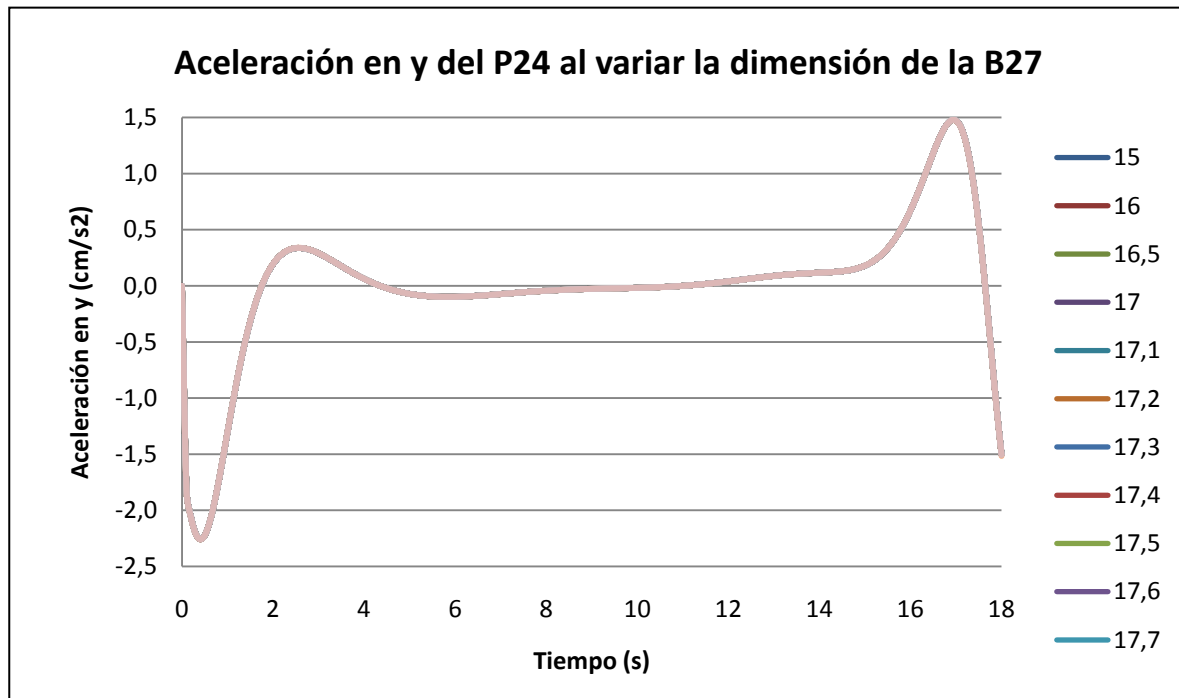
La velocidad absoluta que describe el punto respecto al tiempo es la misma para todas las barras, independientemente de su tamaño.

BARRA 27



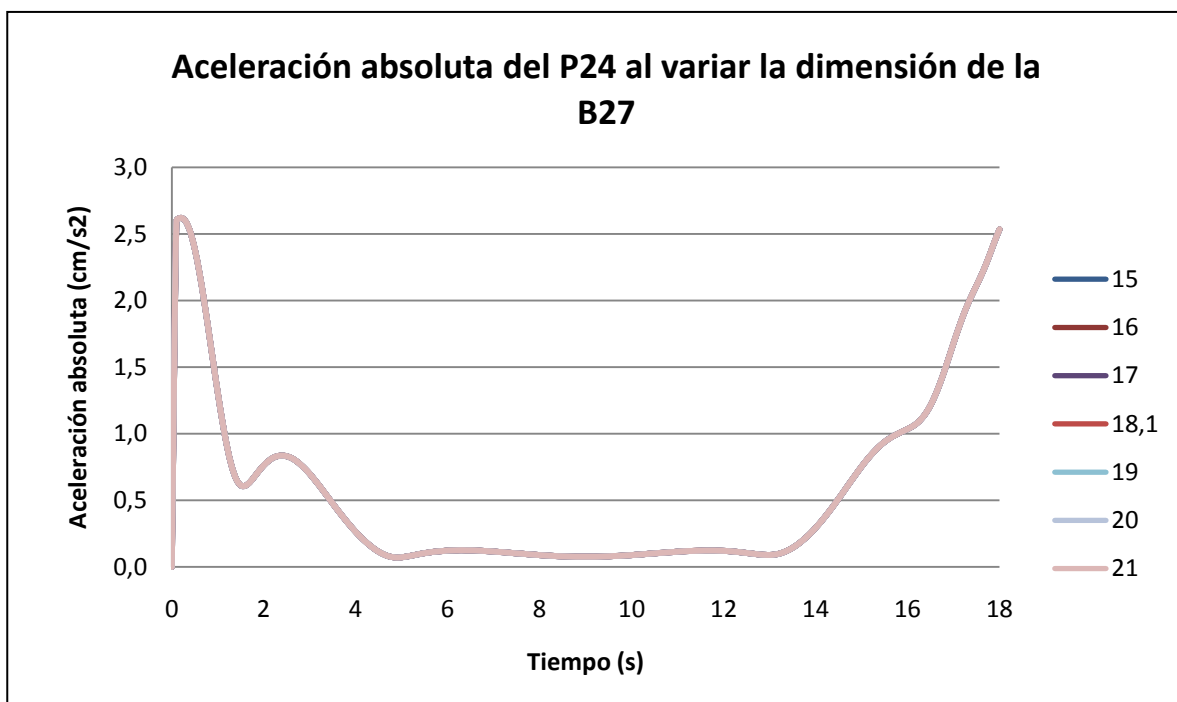
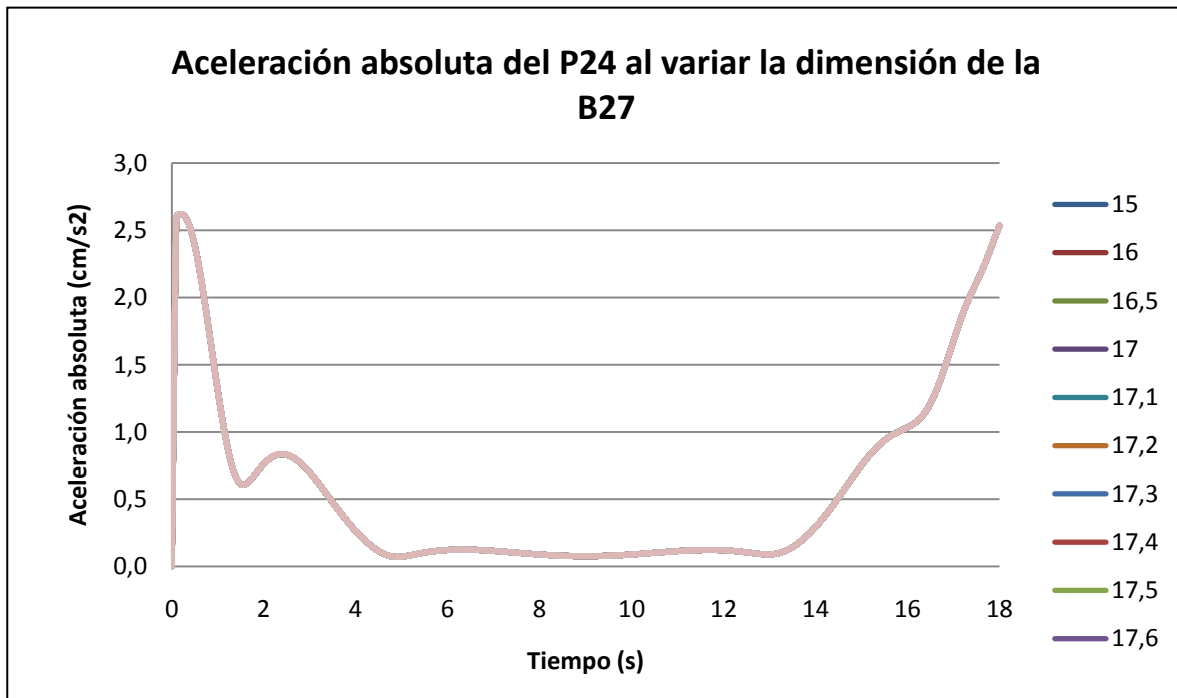
La aceleración en el eje de abscisas que describe el punto respecto al tiempo es la misma para todas las barras, independientemente de su tamaño.

BARRA 27



La aceleración en el eje de ordenadas que describe el punto respecto al tiempo es la misma para todas las barras, independientemente de su tamaño.

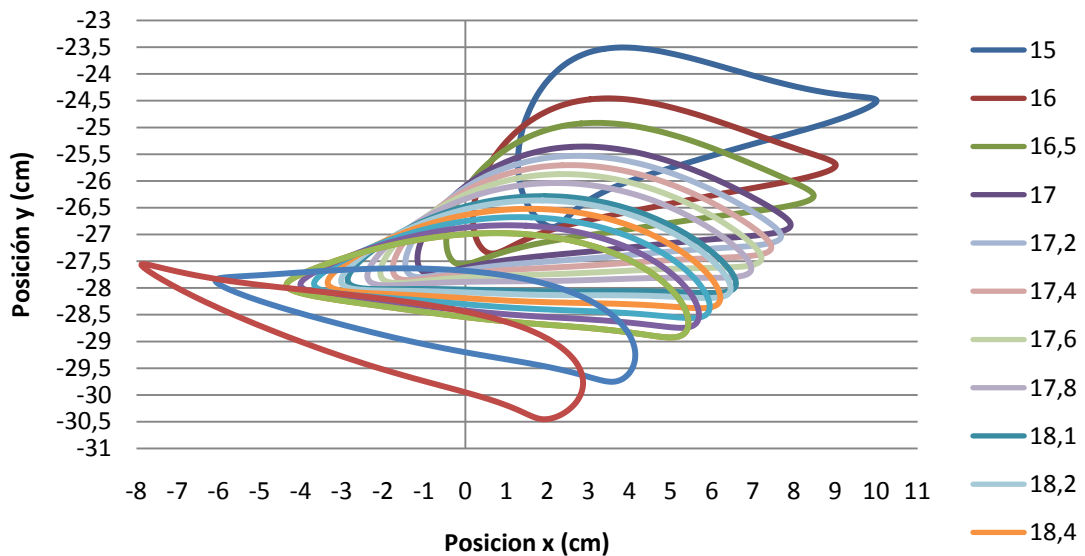
BARRA 27



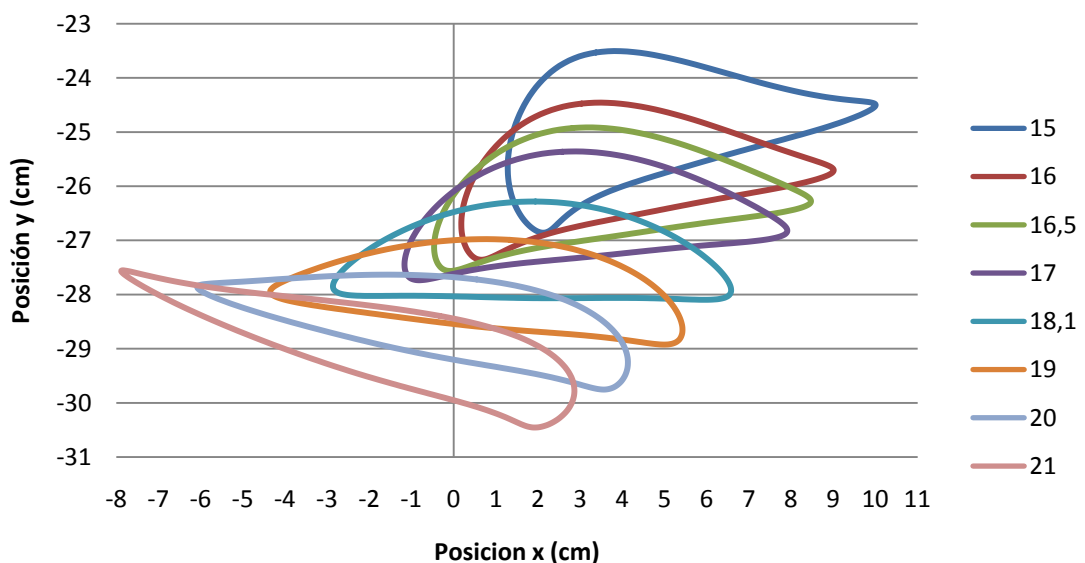
La aceleración absoluta que describe el punto respecto al tiempo es la misma para todas las barras, independientemente de su tamaño.

BARRA 27

Posicionamiento del P41 al variar la dimensión de la B27

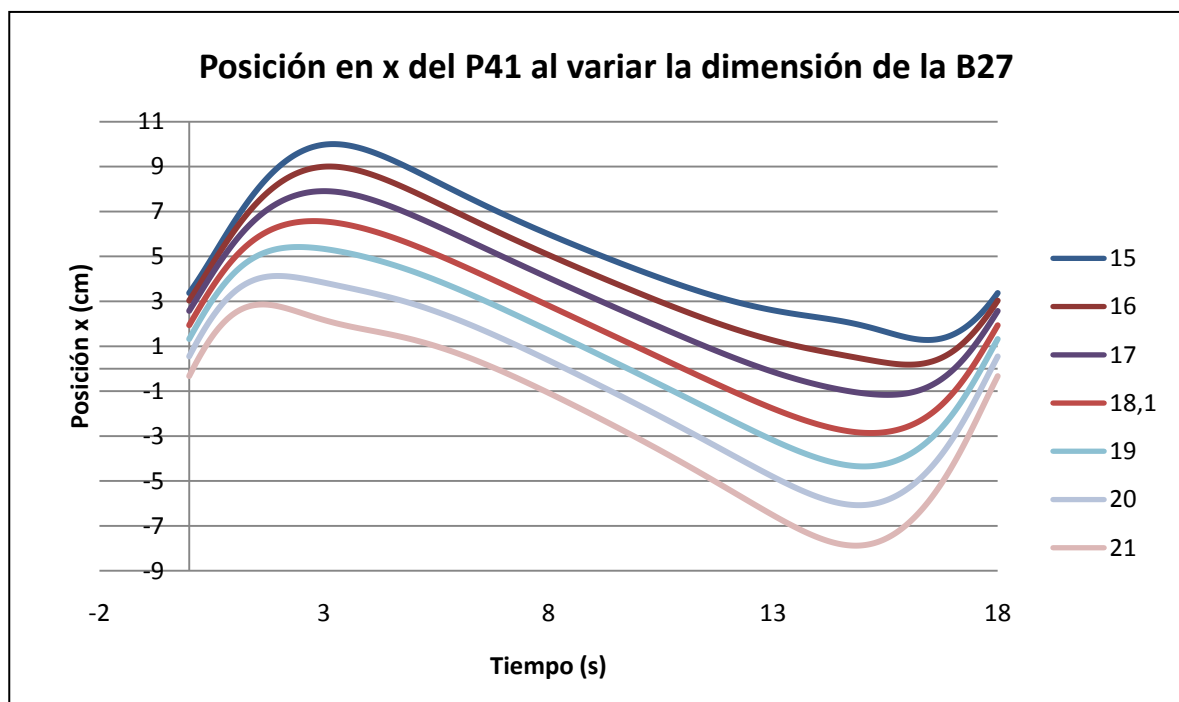
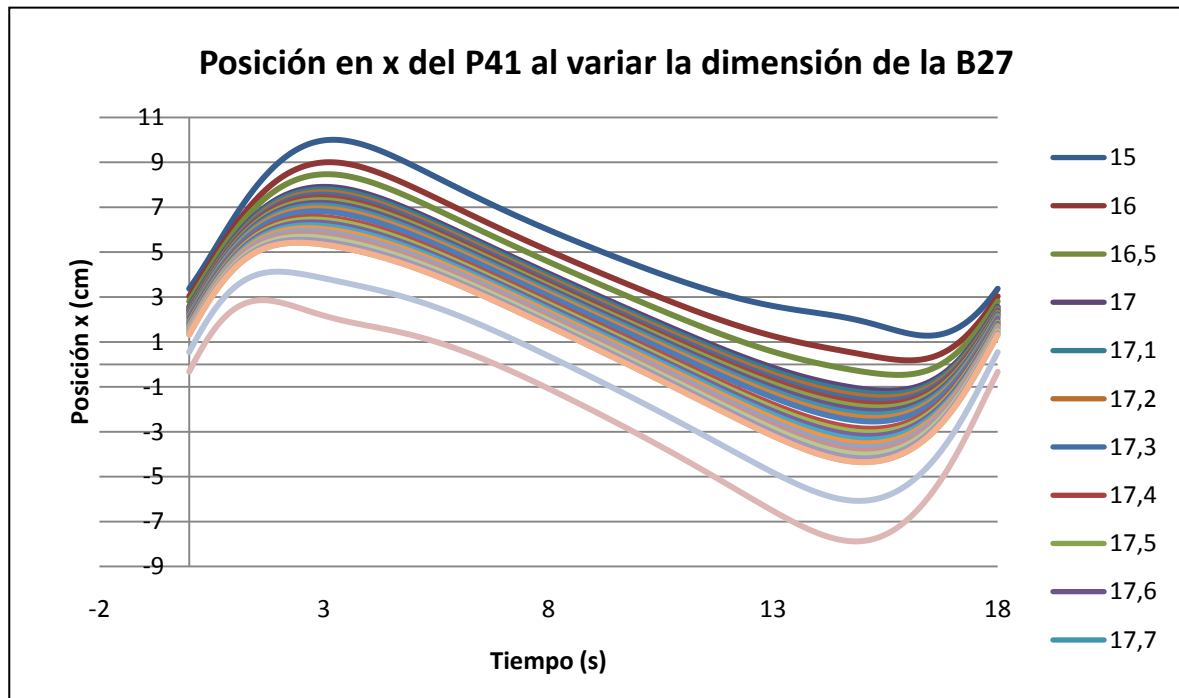


Posicionamiento del P41 al variar la dimensión de la B27



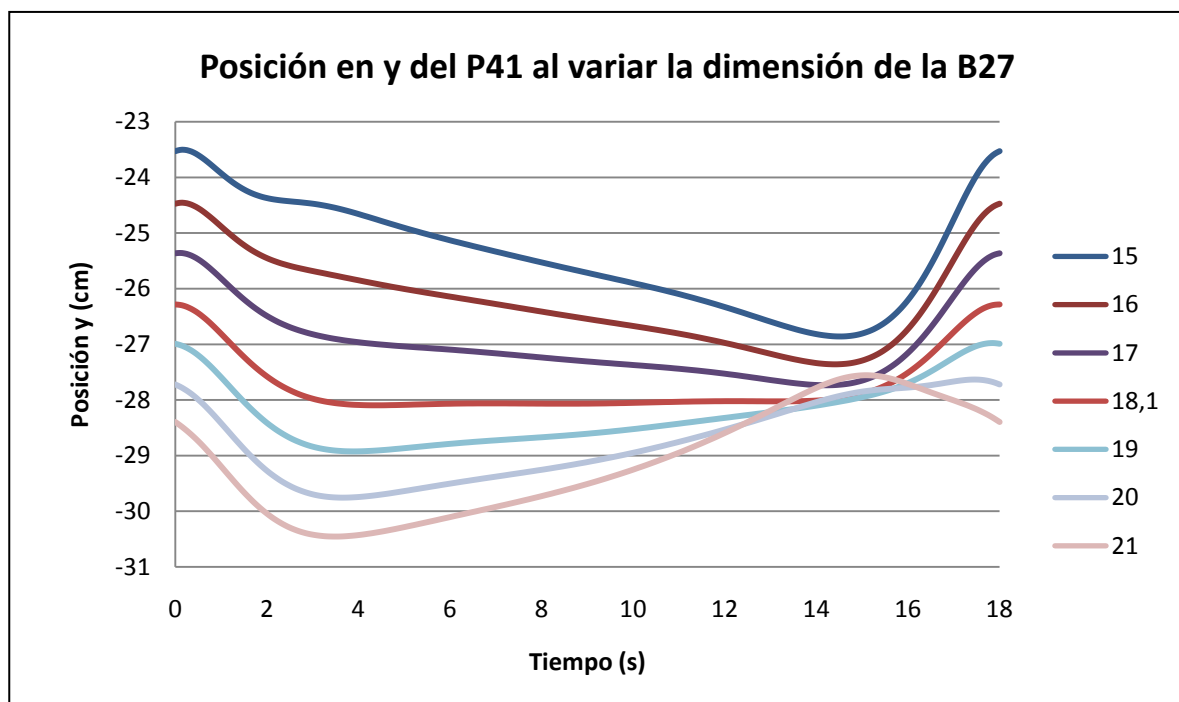
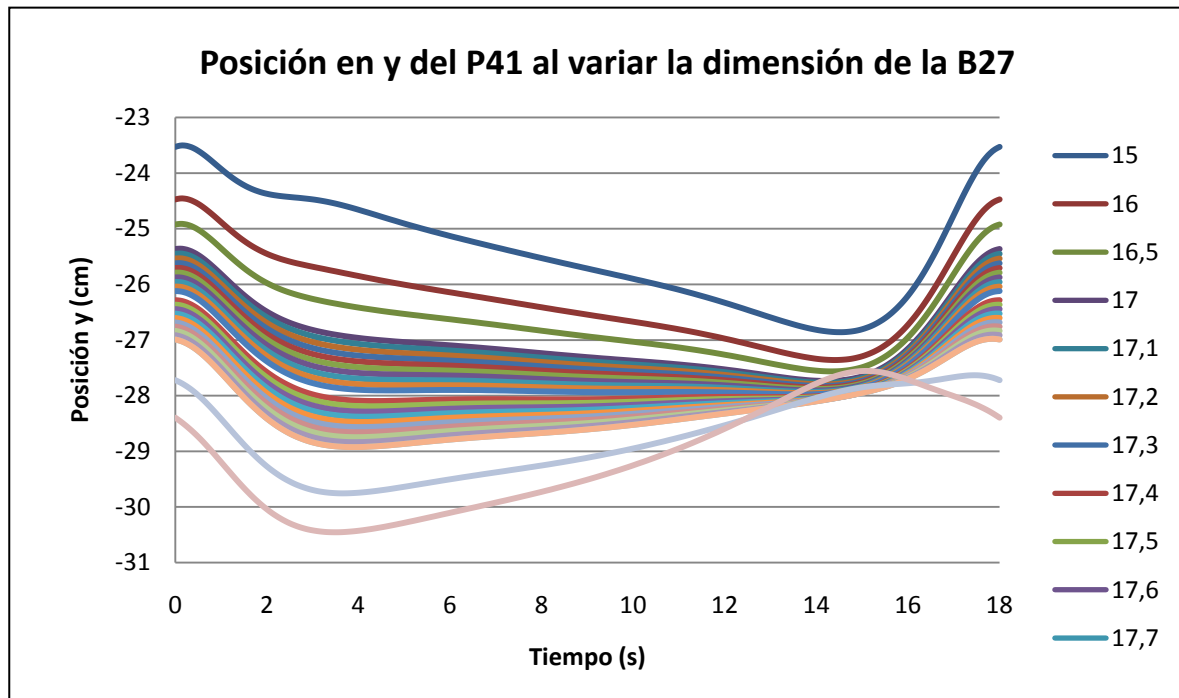
Las distintas trayectorias que describen las distintas barras guardan cierta relación, ya que se puede apreciar una cierta evolución en lo que sería el “perfil” que describe. A mayor tamaño de la barra, mayor posicionamiento en el eje x (tomándolo como valor absoluto) mientras que a menor tamaño de la barra se produce un posicionamiento mayor en el eje y.

BARRA 27



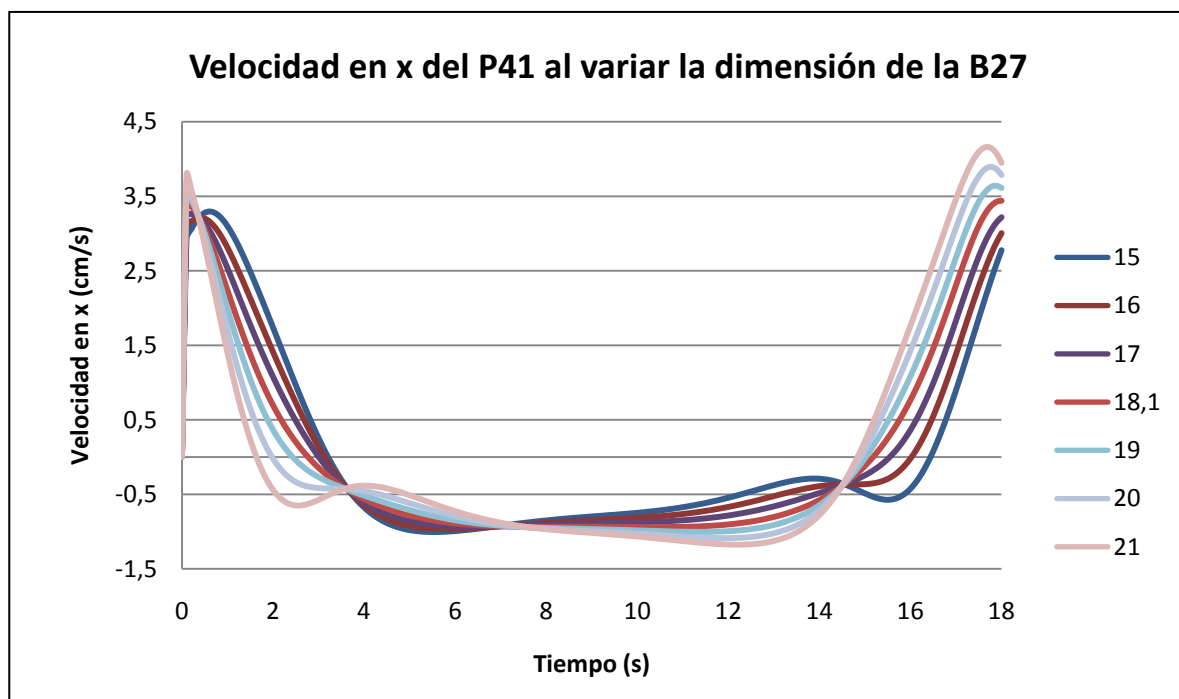
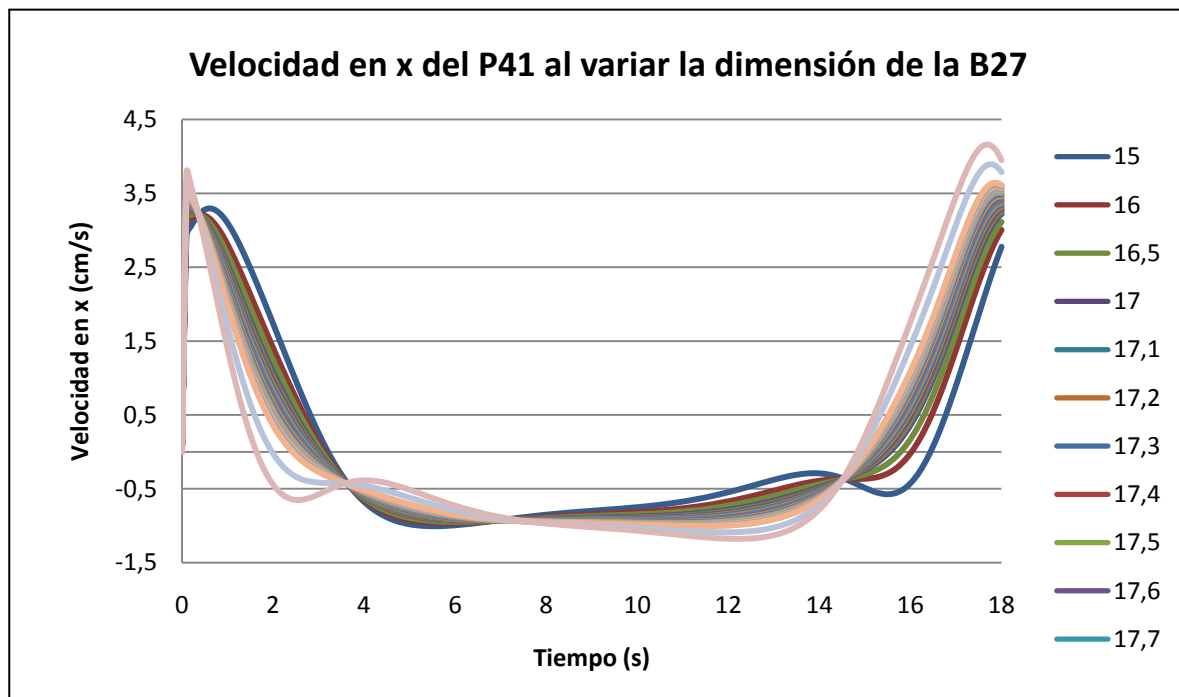
A mayor tamaño de la barra, se obtiene una posición menor en la gráfica respecto al tiempo, teniendo el máximo en 3 segundos y el mínimo en 15 segundos, aproximadamente.

BARRA 27



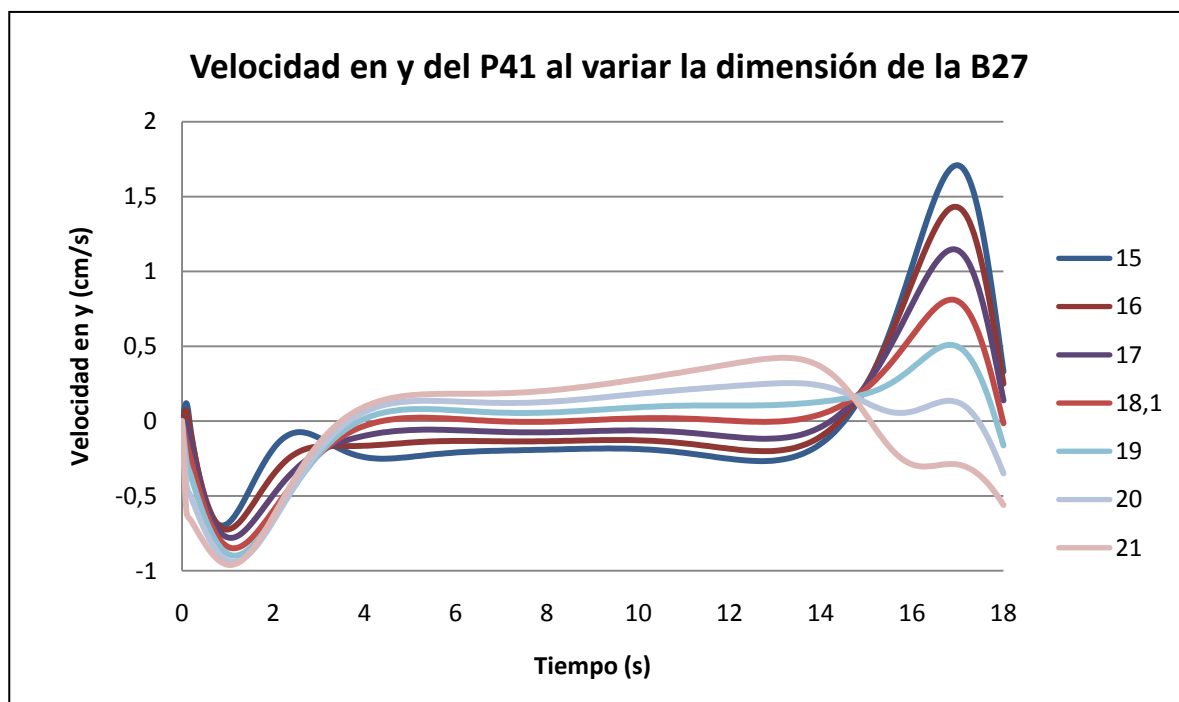
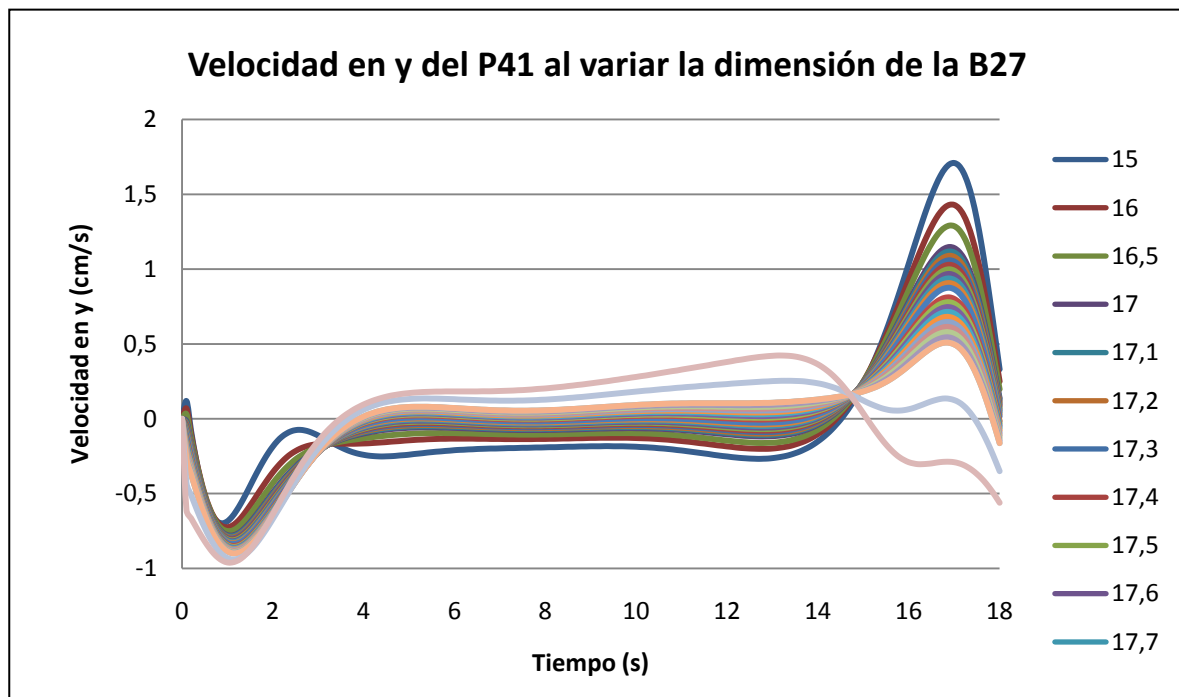
Conforme avanza el tiempo, para una dimensión de la barra mayor, se cuenta con una posición menor en el eje de ordenadas, excepto en las barras de 20 y 21 cm, donde dicha disposición no se cumple.

BARRA 27



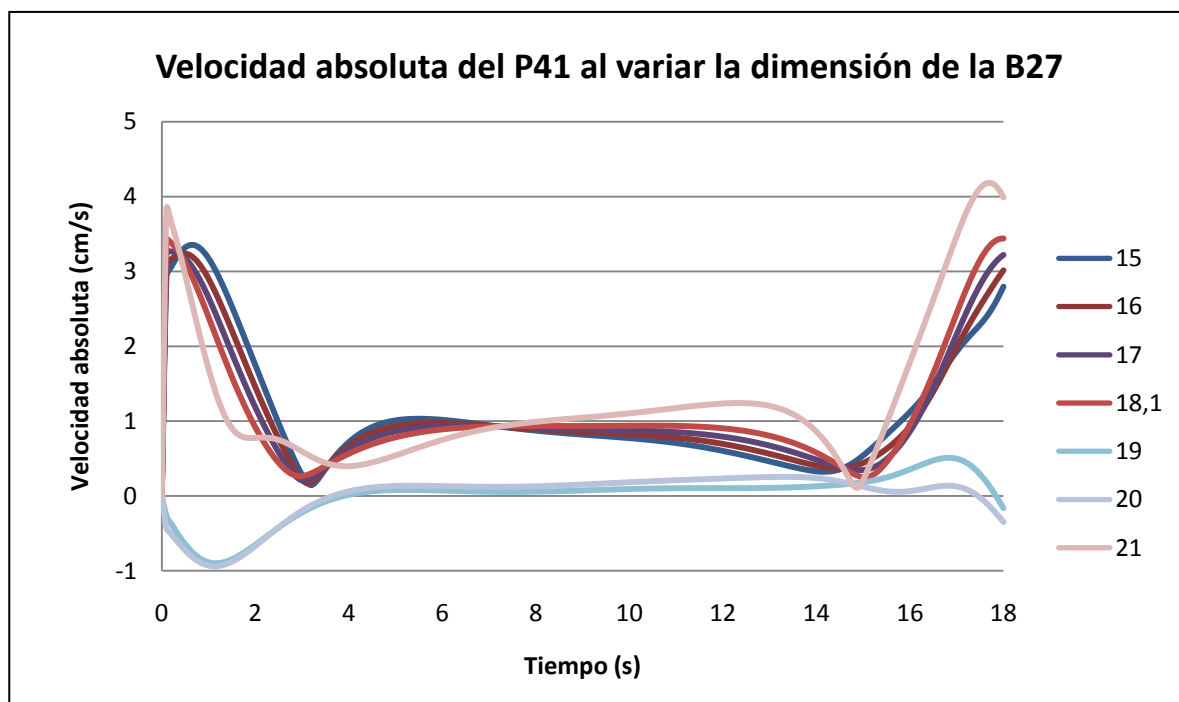
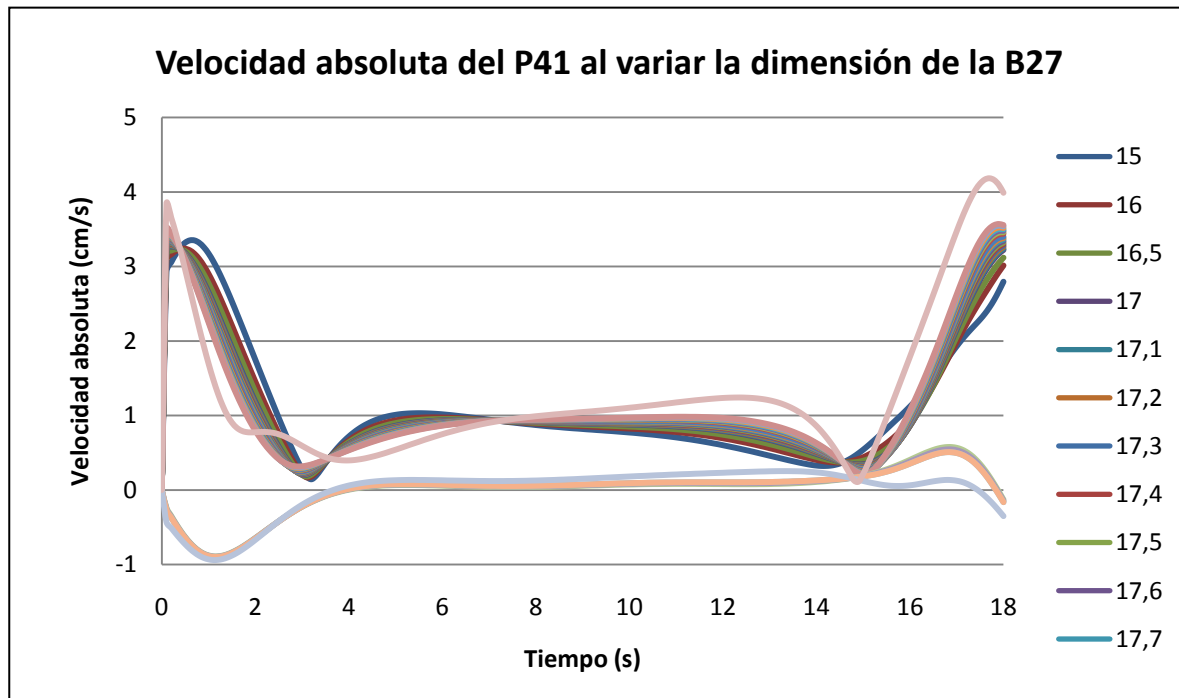
Se puede dividir la gráfica en 4 intervalos. En los intervalos $[0,4]$ y $[7,15]$ segundos, a mayor tamaño de la barra, menor velocidad respecto al eje de abscisas; mientras que en los intervalos $[4,7]$ y $[15,18]$ segundos, a menor tamaño de la barra, mayor velocidad respecto al eje de abscisas. Nótese también, que las velocidades se igualan en los instantes de tiempo 4, 7 y 15 segundos.

BARRA 27



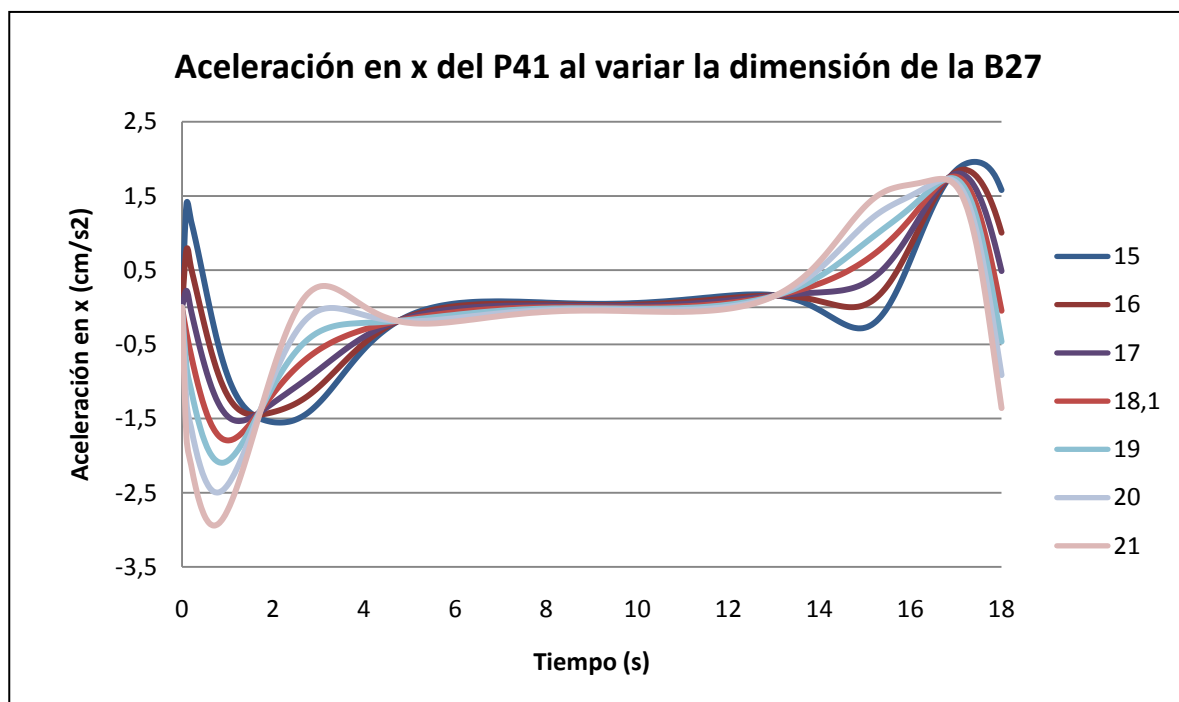
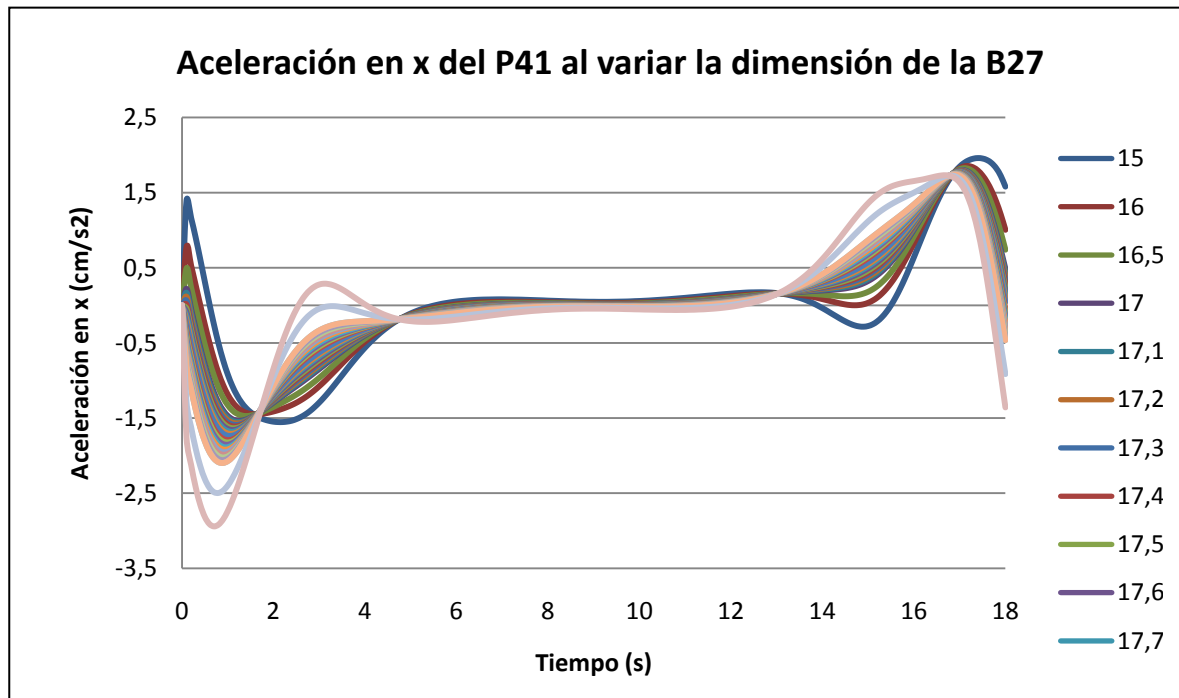
Se producen bastantes diferencias para las distintas barras respecto a la velocidad del eje de ordenadas. La mayor diferencia se encuentra en el intervalo $[15,18]$, llegando ésta a alcanzar una diferencia de casi 2 cm/s^2 entre la barra de mayor y menor tamaño. Hay dos instantes de tiempo en los que las velocidades para las distintas barras se igualan: 3 y 15 segundos.

BARRA 27



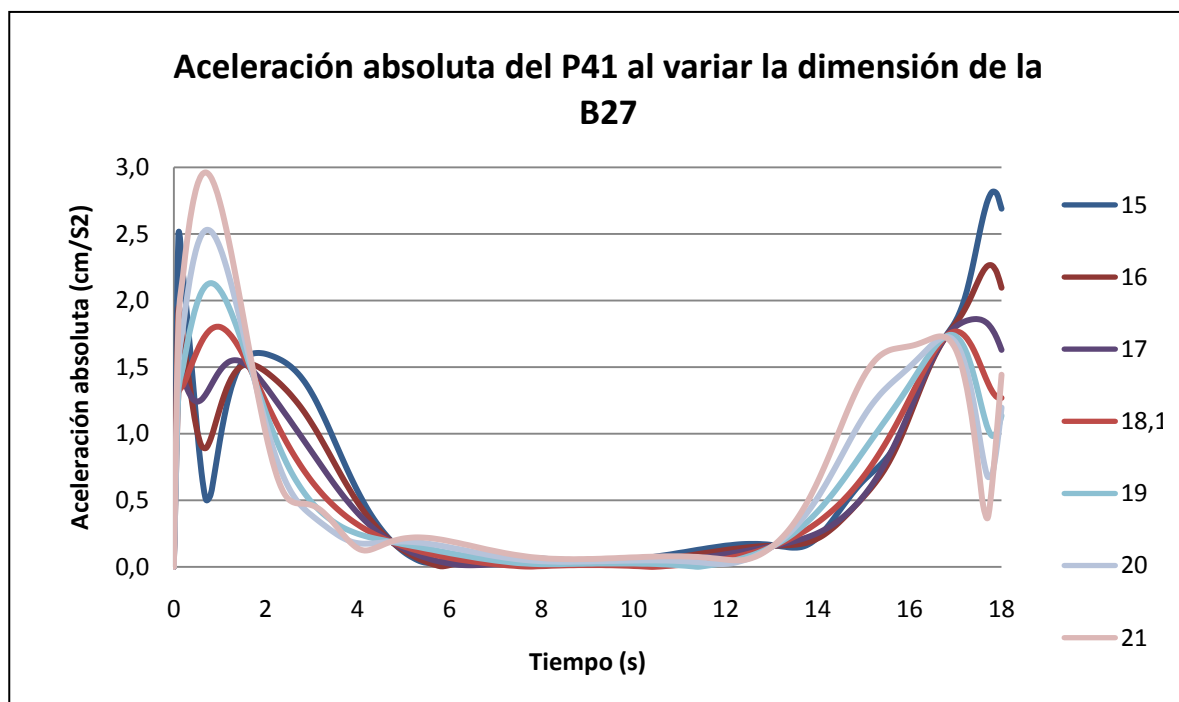
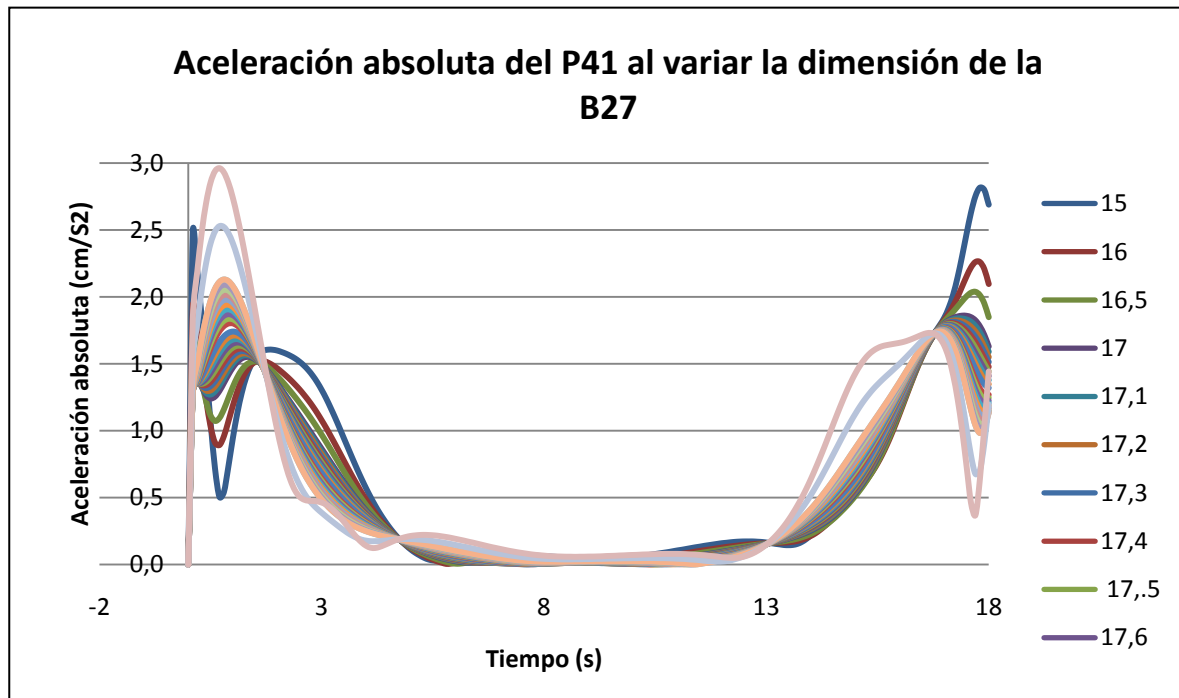
Para un tamaño de barra mayor a 18 cm, se aprecia cómo las velocidades se dispersan y no siguen la tendencia marcada por las barras de menor tamaño. También se puede apreciar cómo para los instantes de tiempo de 4, 7 y 15 segundos, las velocidades coinciden para todas las barras (excepto las de dimensiones mayores a 18 cm).

BARRA 27



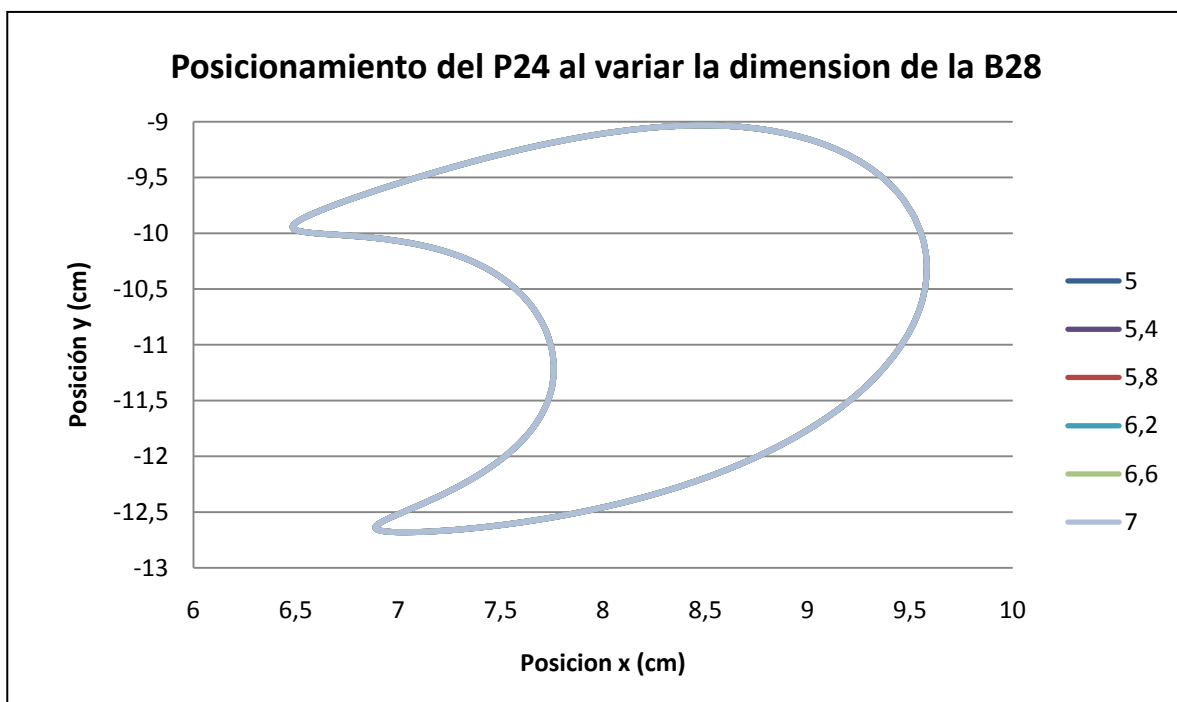
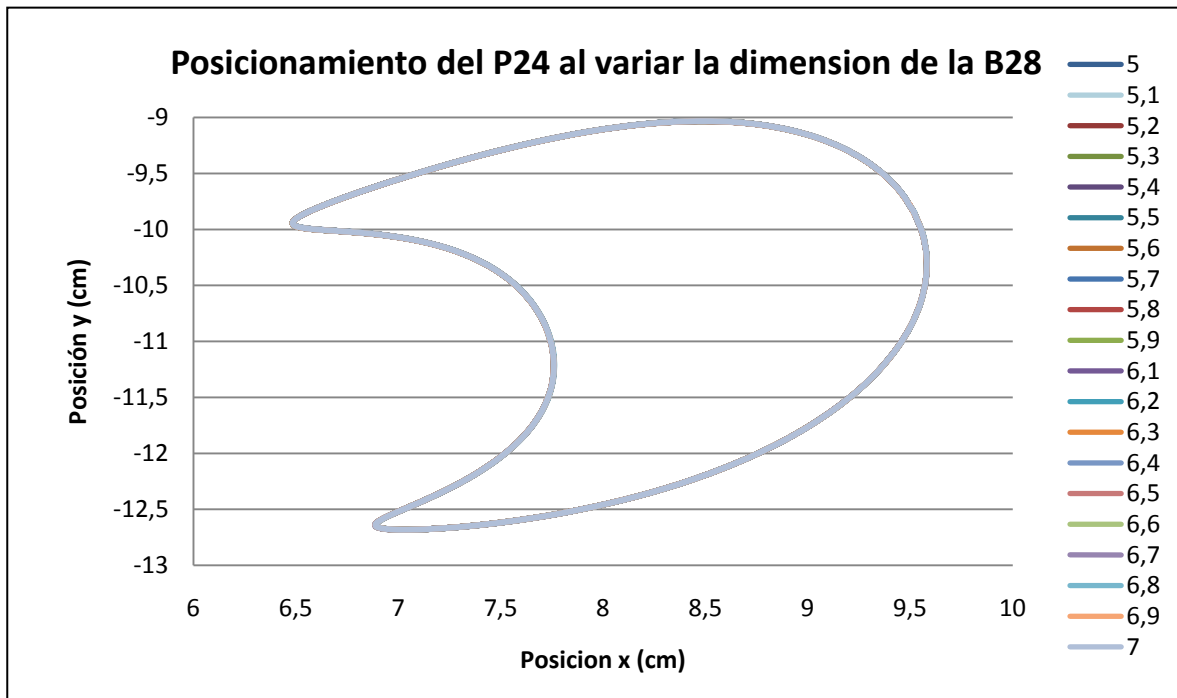
En el intervalo [5,13] segundos, las aceleraciones de las barras son muy similares. Sin embargo, en el resto del rango de estudio, si que se producen diferencias significativas. Así pues para los intervalos [2,5] y [13,17] a medida que aumenta el tamaño de la barra, aumenta la aceleración; mientras que para el intervalo [0,2] ocurre lo contrario. También se observa que para los instantes de tiempo 2, 5, 13 y 17 las aceleraciones coinciden independientemente del tamaño de la barra.

BARRA 27



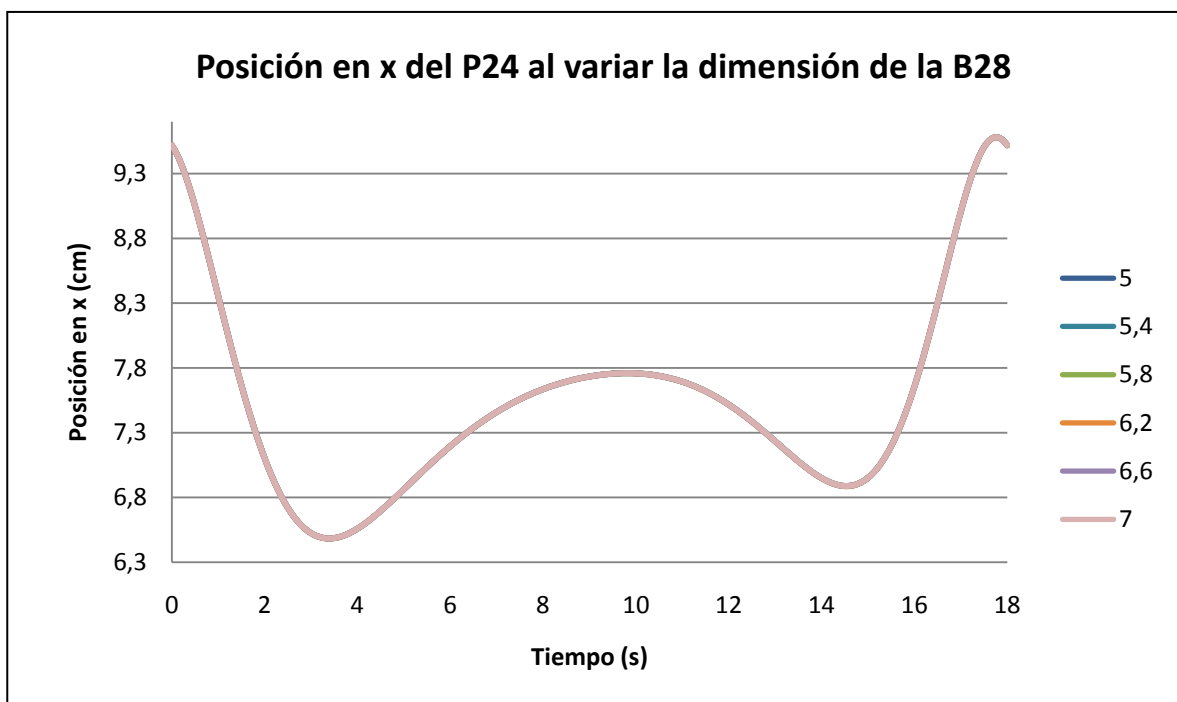
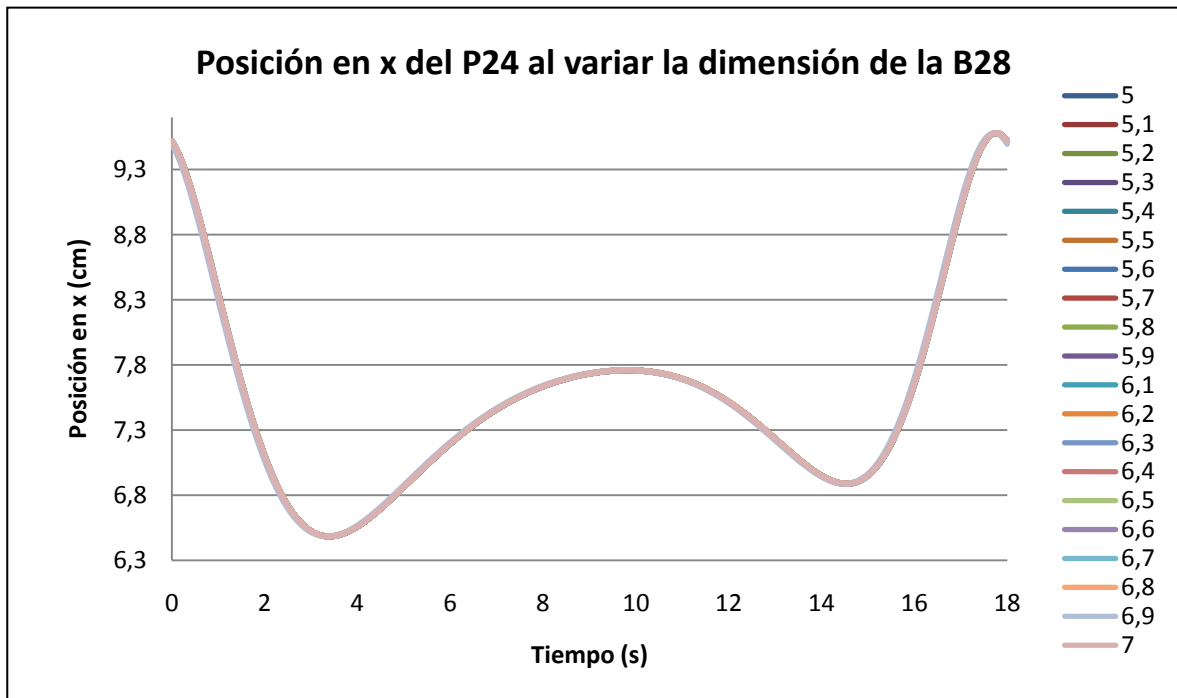
En este caso, cabe destacar que en los instantes de tiempo 2, 5, 13 y 17 las aceleraciones coinciden independientemente del tamaño de las barras. Por otra parte, también se destacan los intervalos [0,2] y [2,5]. En el primero, a mayor tamaño de la barra, se produce una aceleración mayor, mientras que en el segundo pasa justo al contrario, a mayor tamaño de la barra, menor aceleración.

BARRA 28



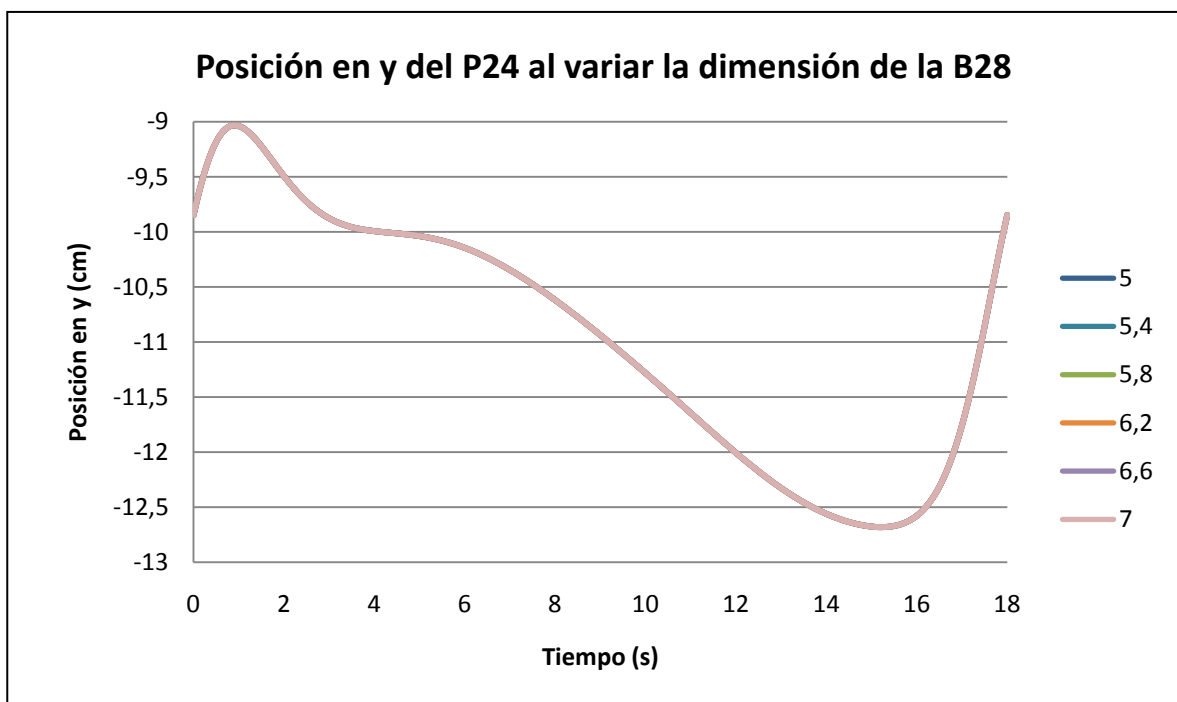
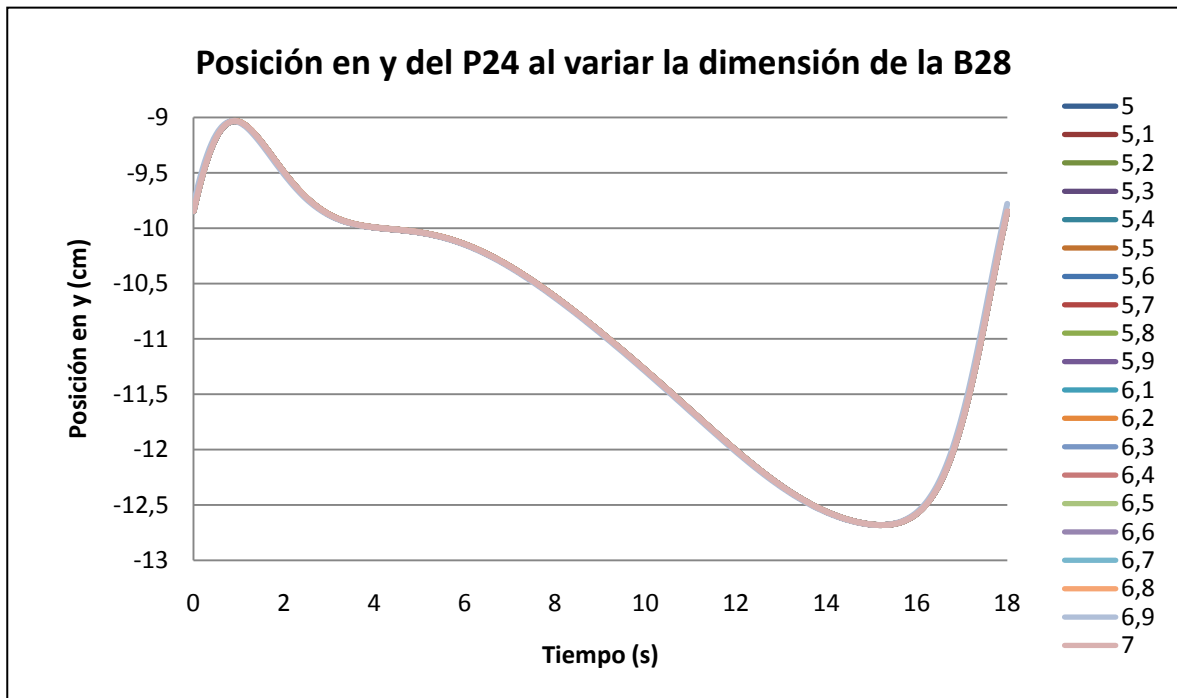
La trayectoria que describe el punto respecto a los ejes de ordenadas y de abscisas es la misma para todas las barras.

BARRA 28



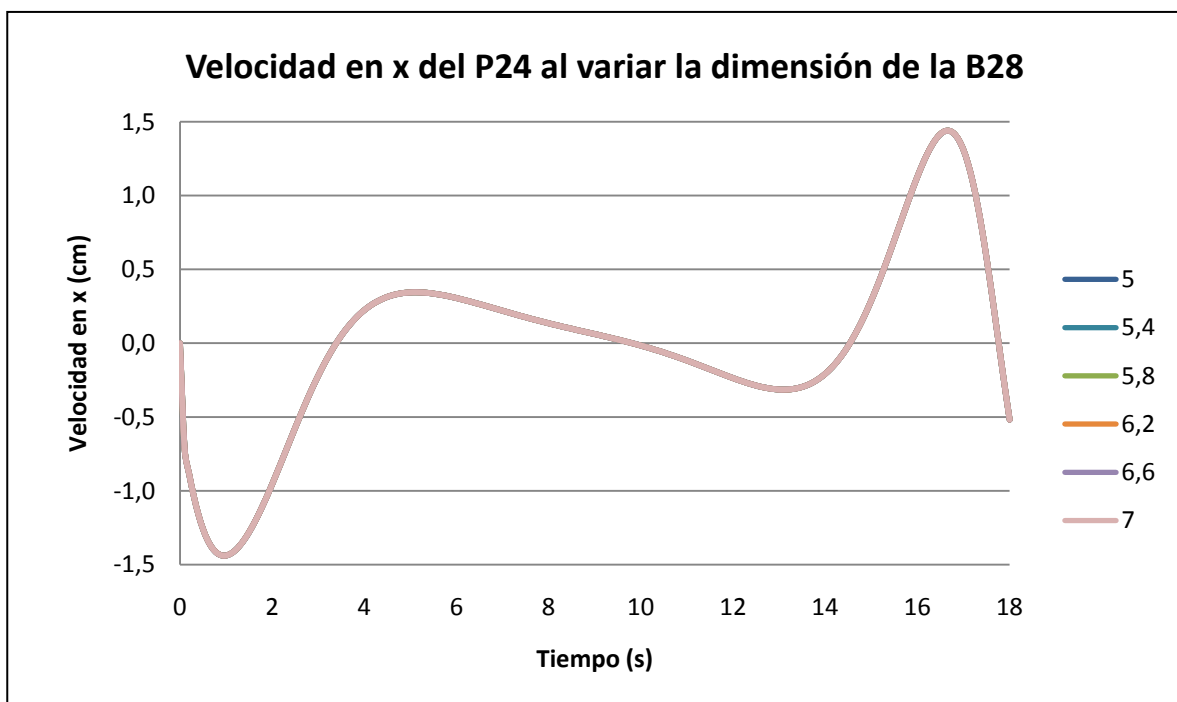
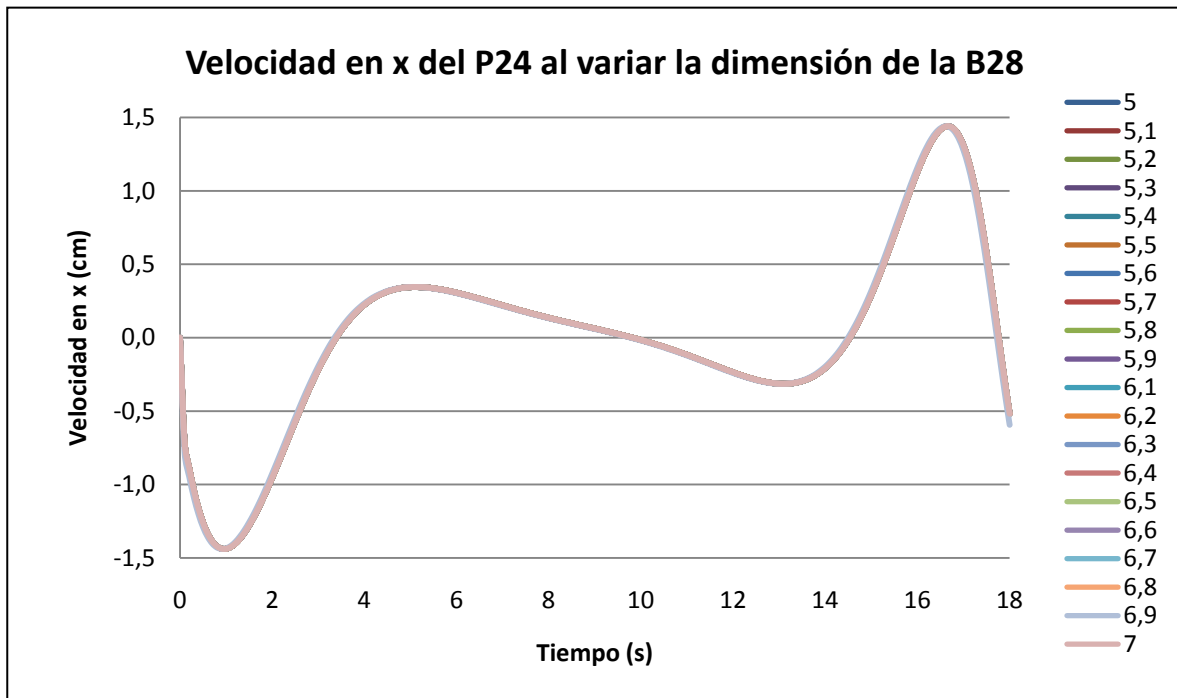
La posición en el eje de abscisas que describe el punto respecto al tiempo es la misma para todas las barras, independientemente de su tamaño.

BARRA 28



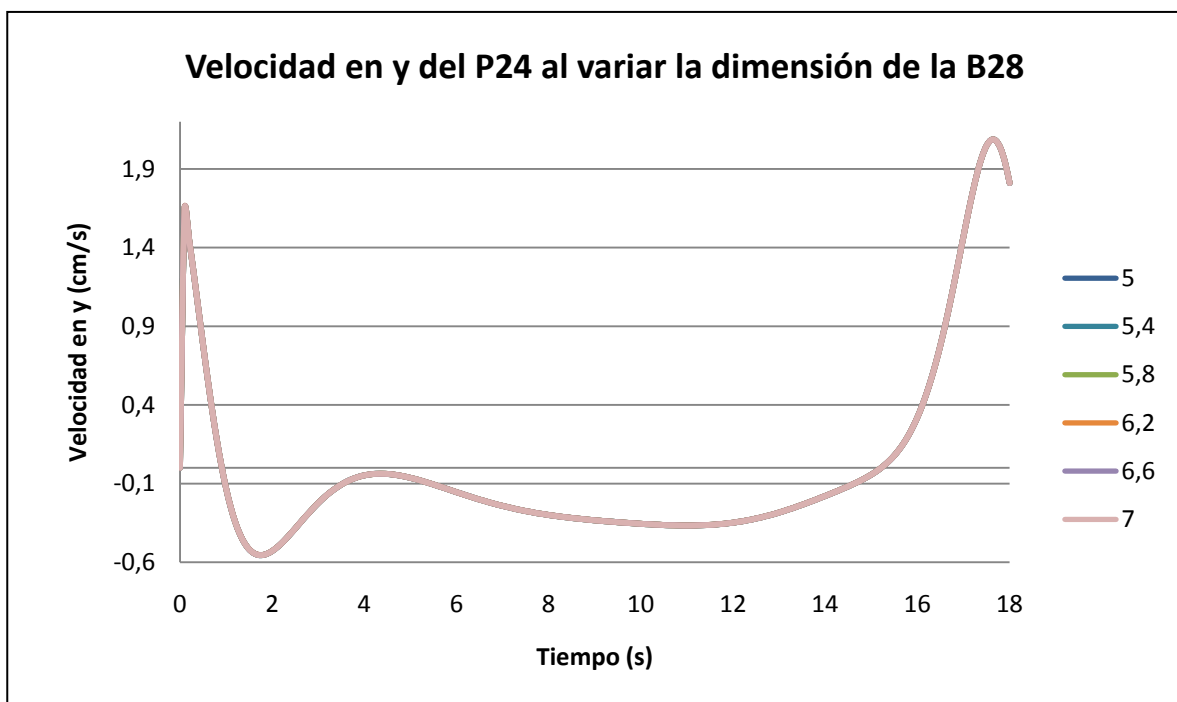
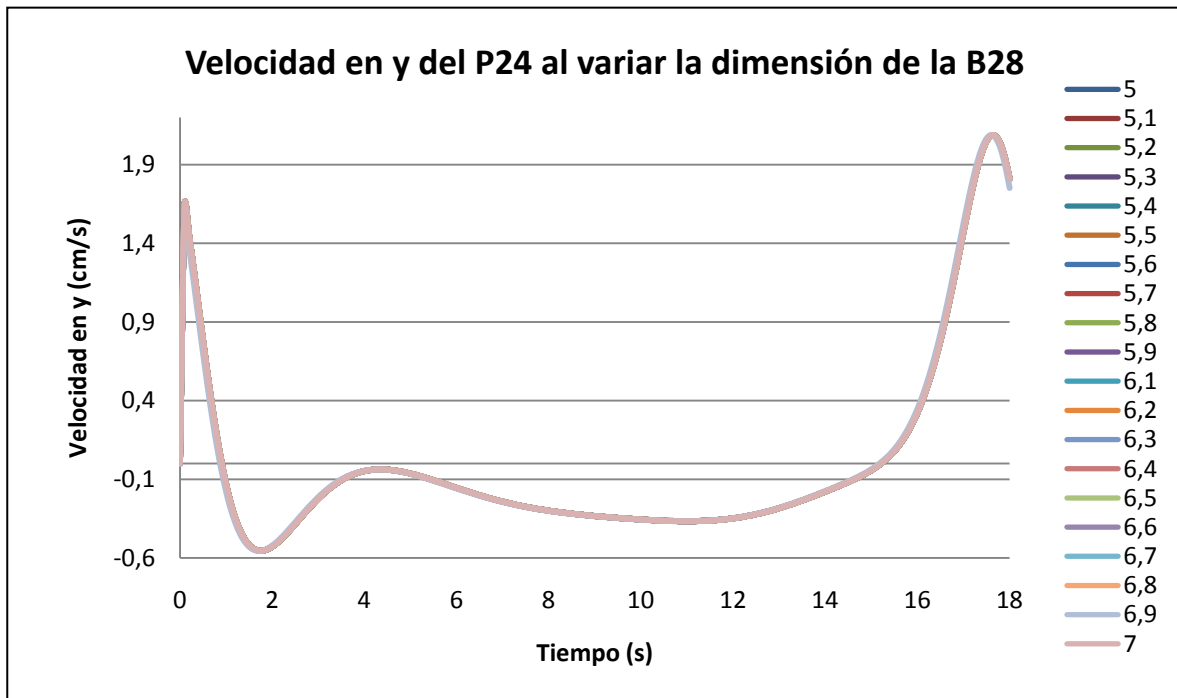
La posición en el eje de ordenadas que describe el punto respecto al tiempo es la misma para todas las barras, independientemente de su tamaño.

BARRA 28



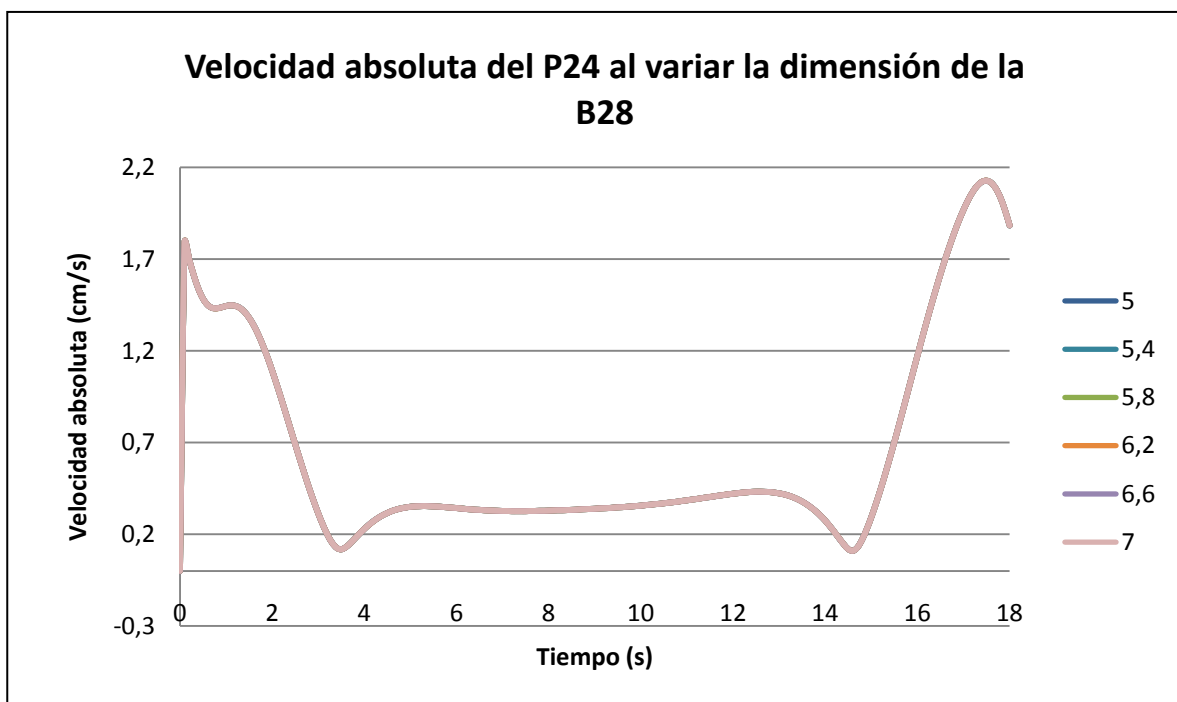
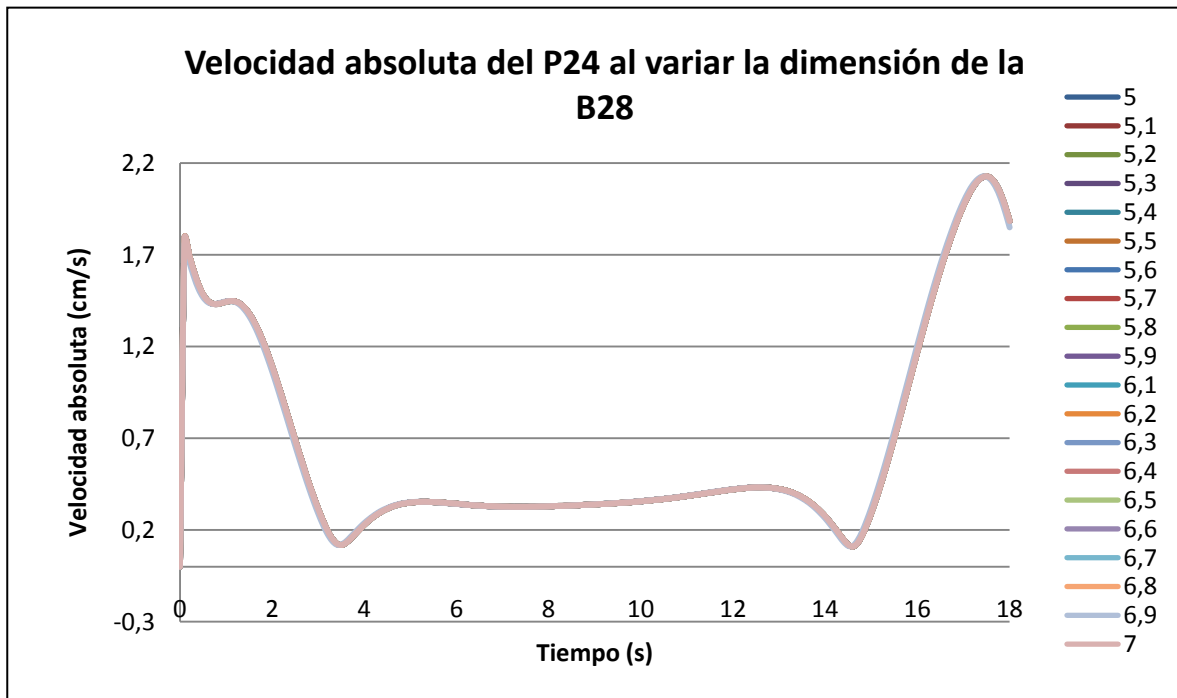
La velocidad en el eje de abscisas que describe el punto respecto al tiempo es la misma para todas las barras, independientemente de su tamaño.

BARRA 28



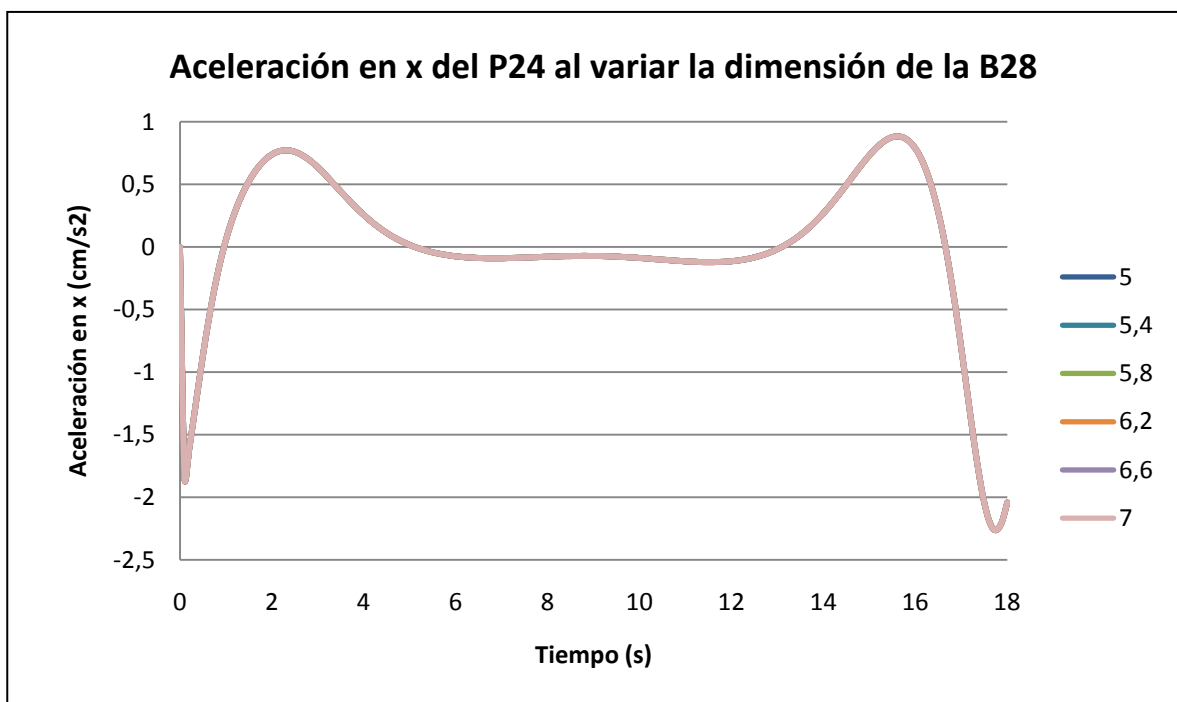
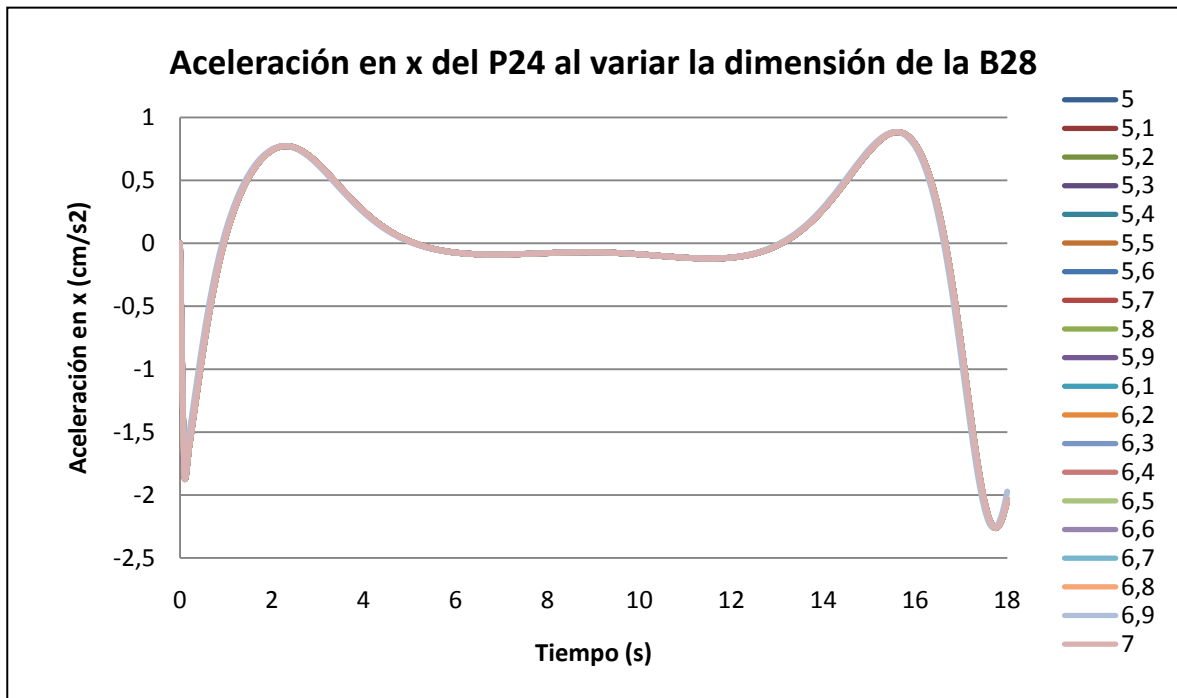
La velocidad en el eje de ordenadas que describe el punto respecto al tiempo es la misma para todas las barras, independientemente de su tamaño.

BARRA 28



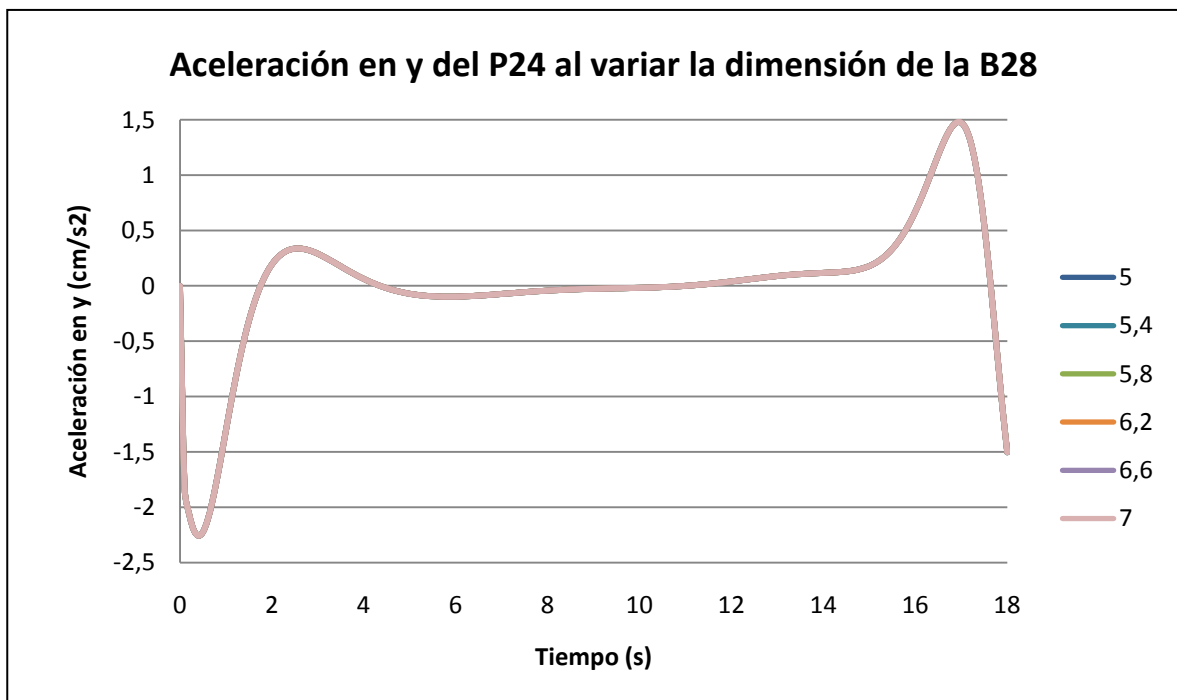
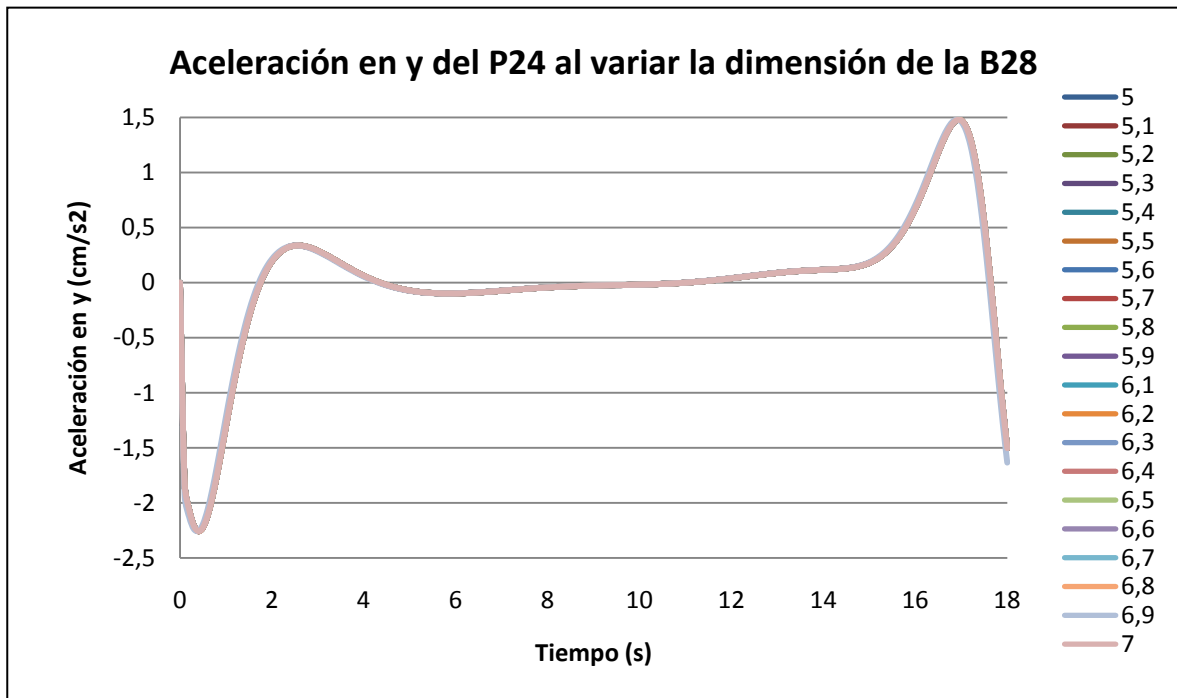
La velocidad absoluta que describe el punto respecto al tiempo es la misma para todas las barras, independientemente de su tamaño.

BARRA 28



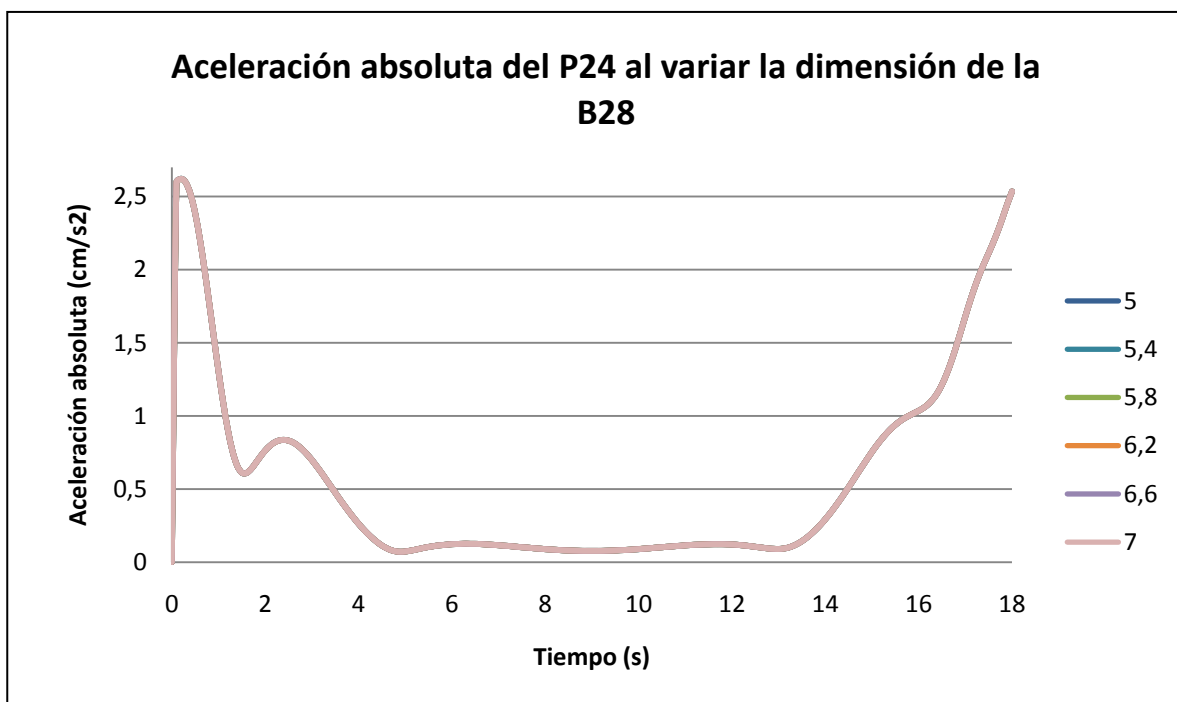
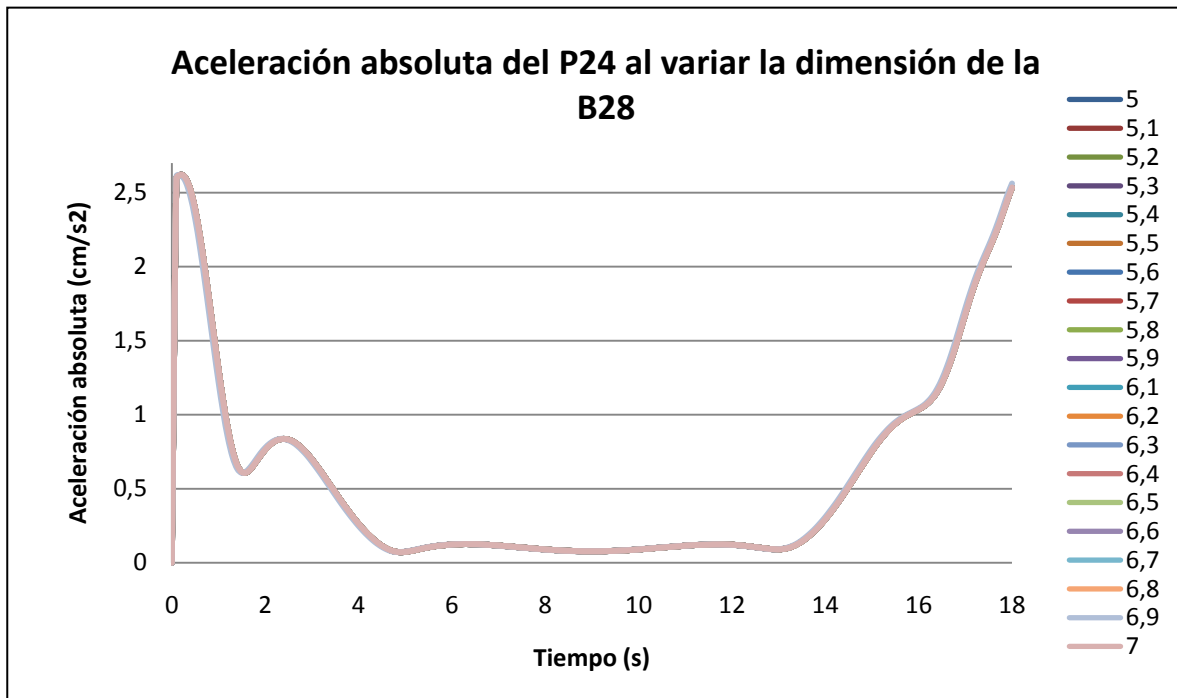
La aceleración en el eje de abscisas que describe el punto respecto al tiempo es la misma para todas las barras, independientemente de su tamaño.

BARRA 28



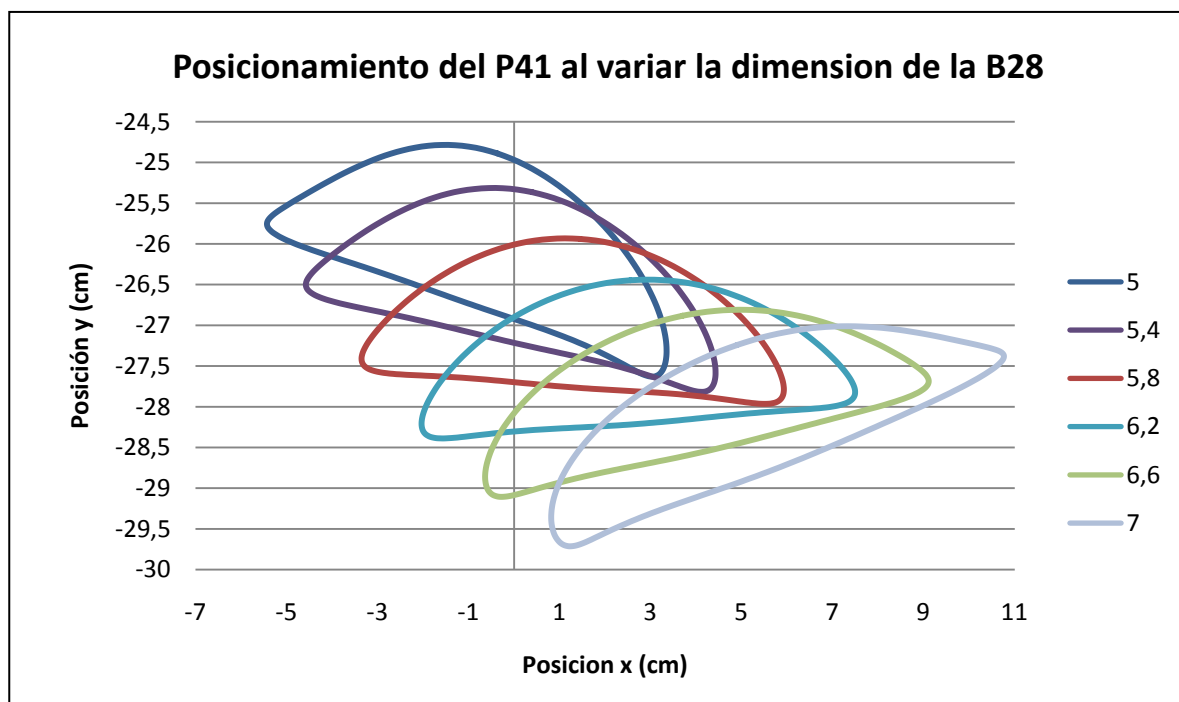
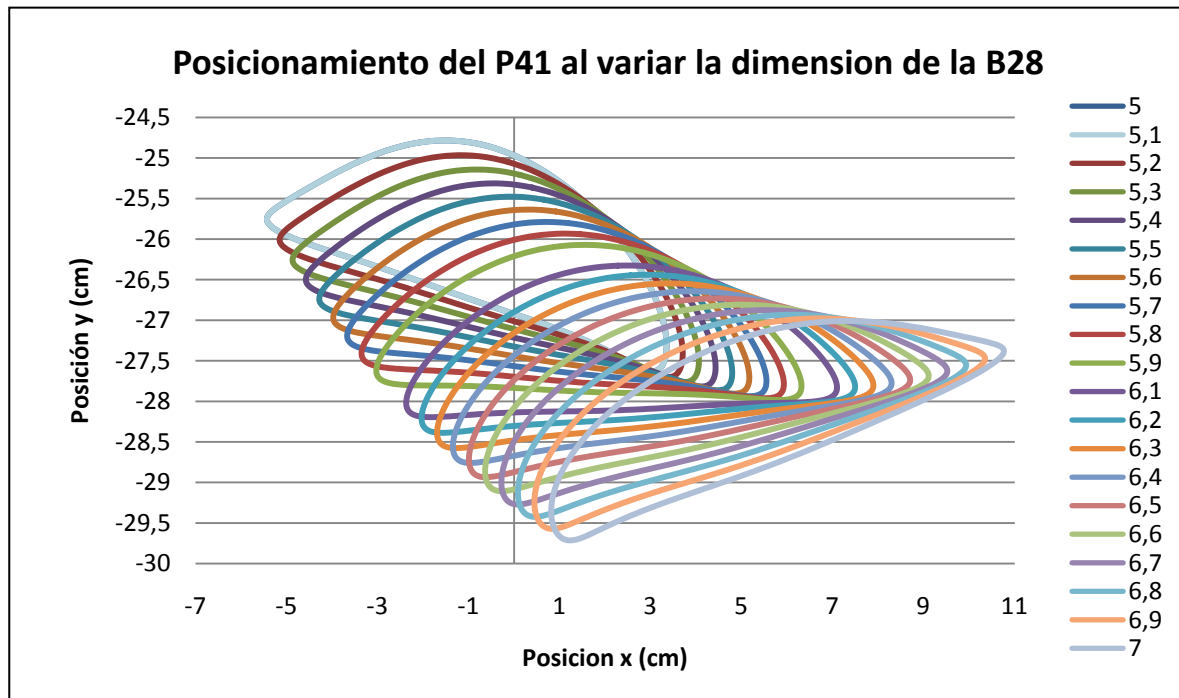
La aceleración en el eje de ordenadas que describe el punto respecto al tiempo es la misma para todas las barras, independientemente de su tamaño.

BARRA 28



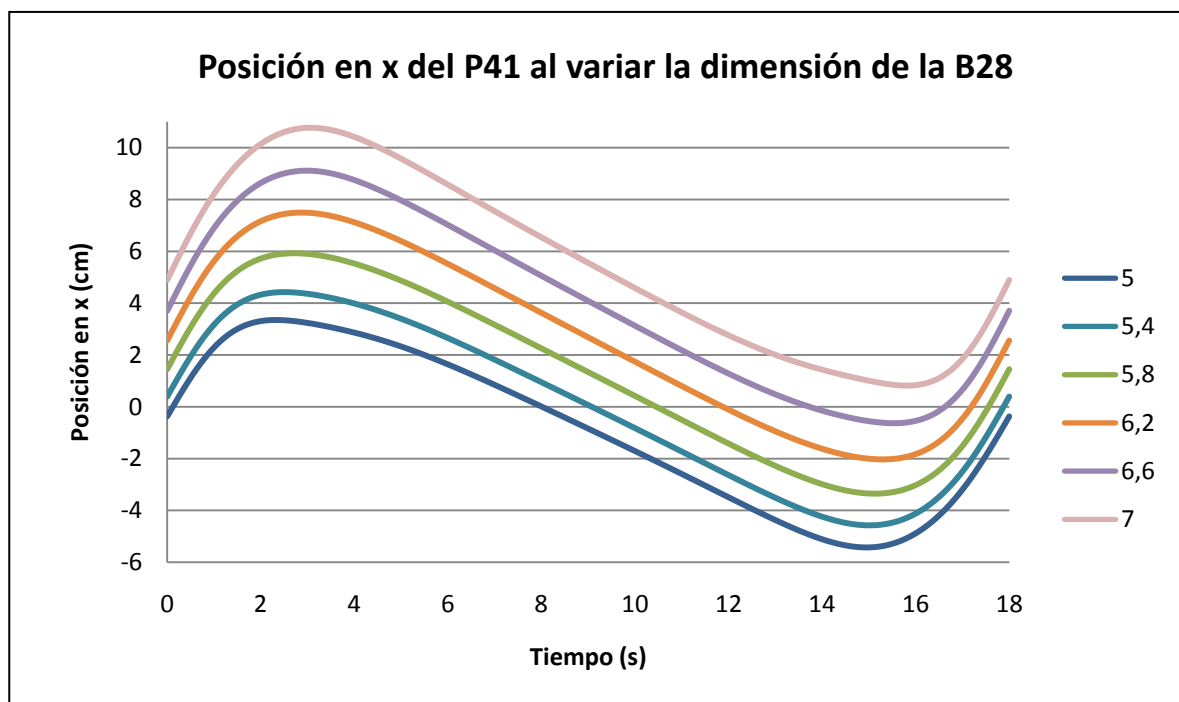
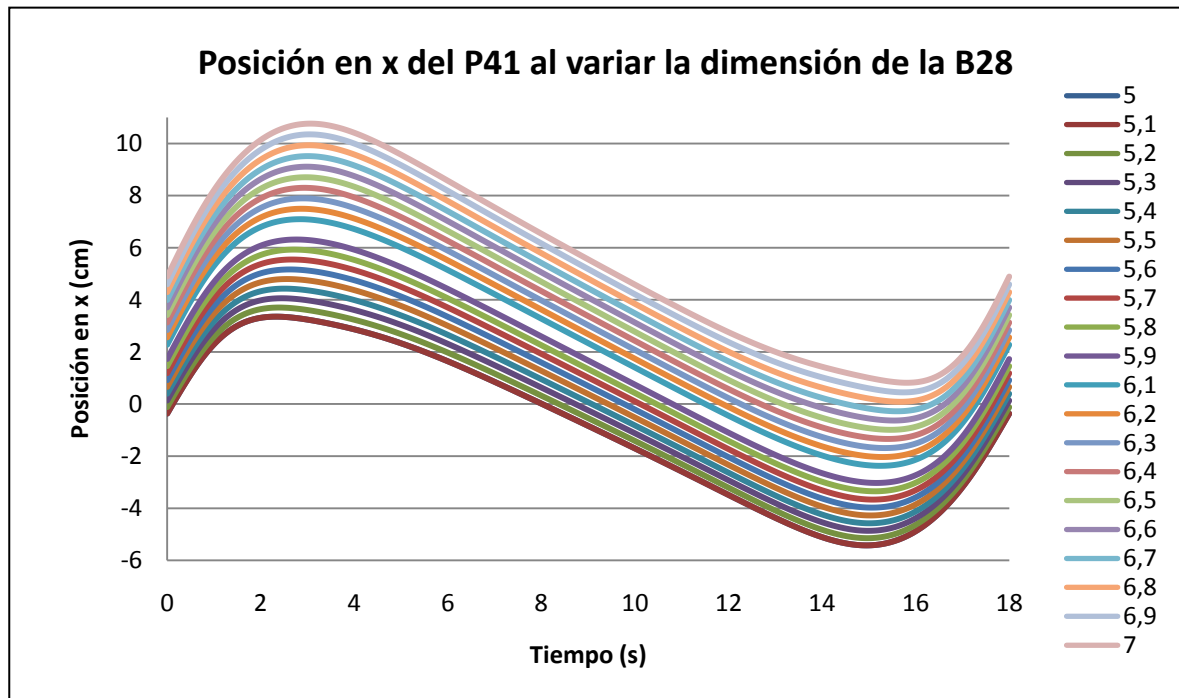
La aceleración absoluta que describe el punto respecto al tiempo es la misma para todas las barras, independientemente de su tamaño.

BARRA 28



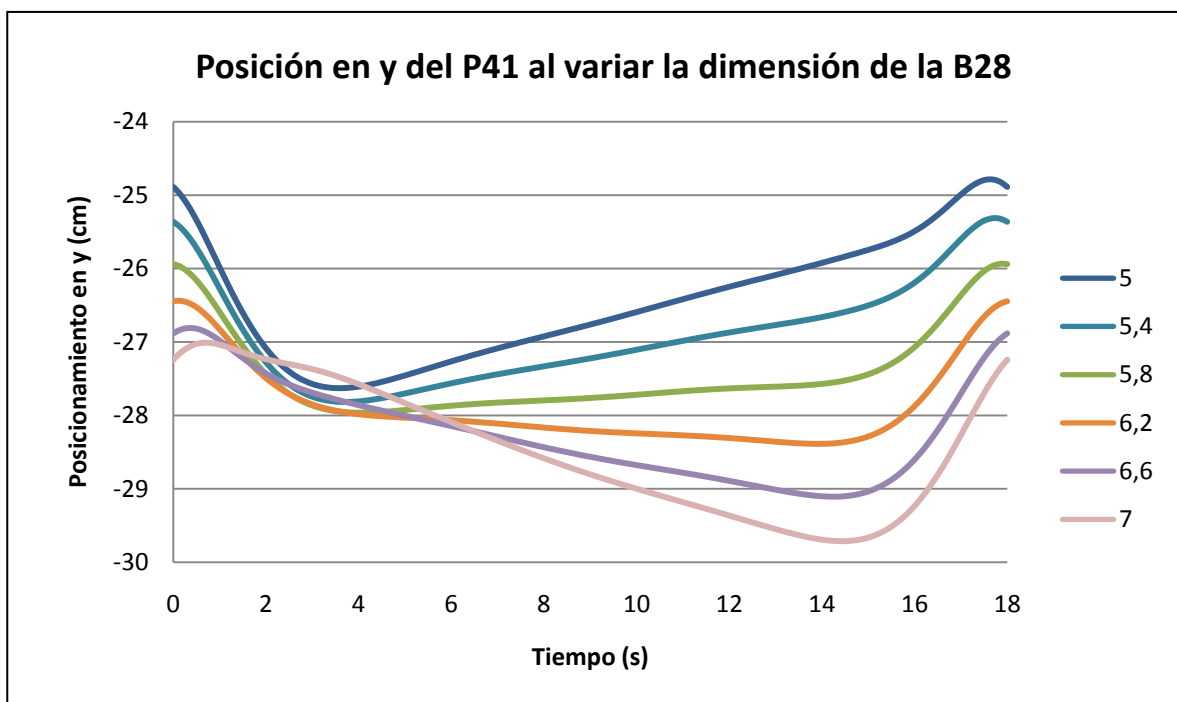
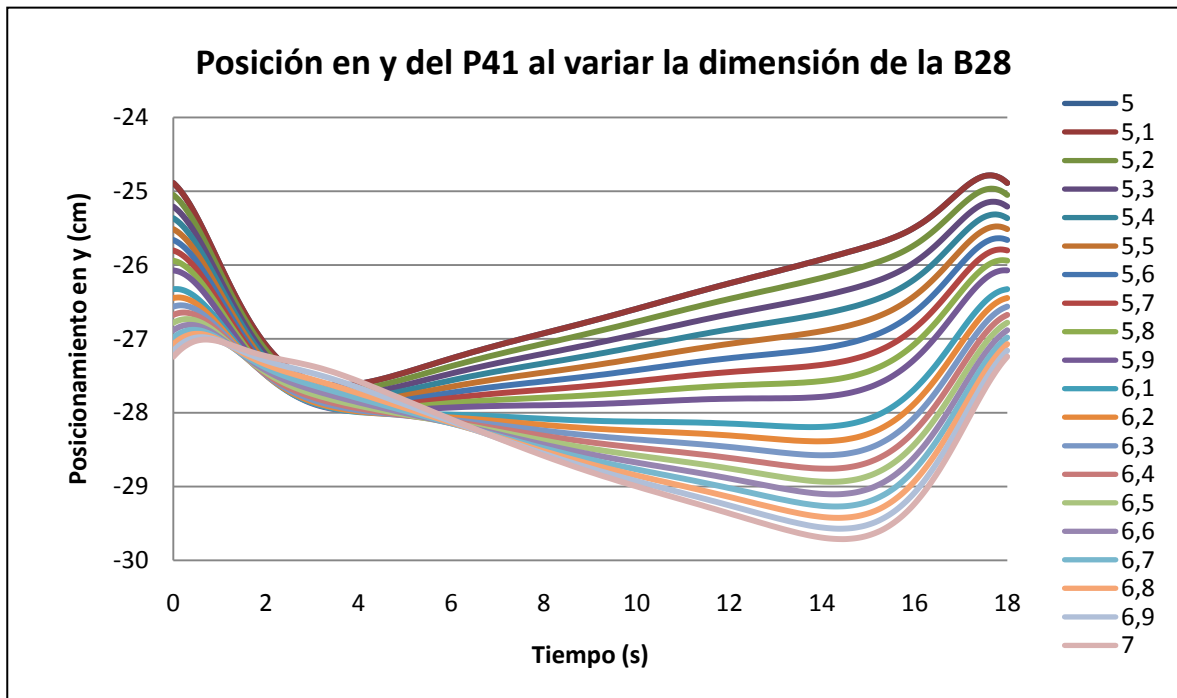
En esta gráfica quedan reflejados los distintos perfiles de posición para cada una de las barras. A medida que se aumentan las dimensiones de la barra, la trayectoria del perfil aumenta en cuanto a longitud.

BARRA 28



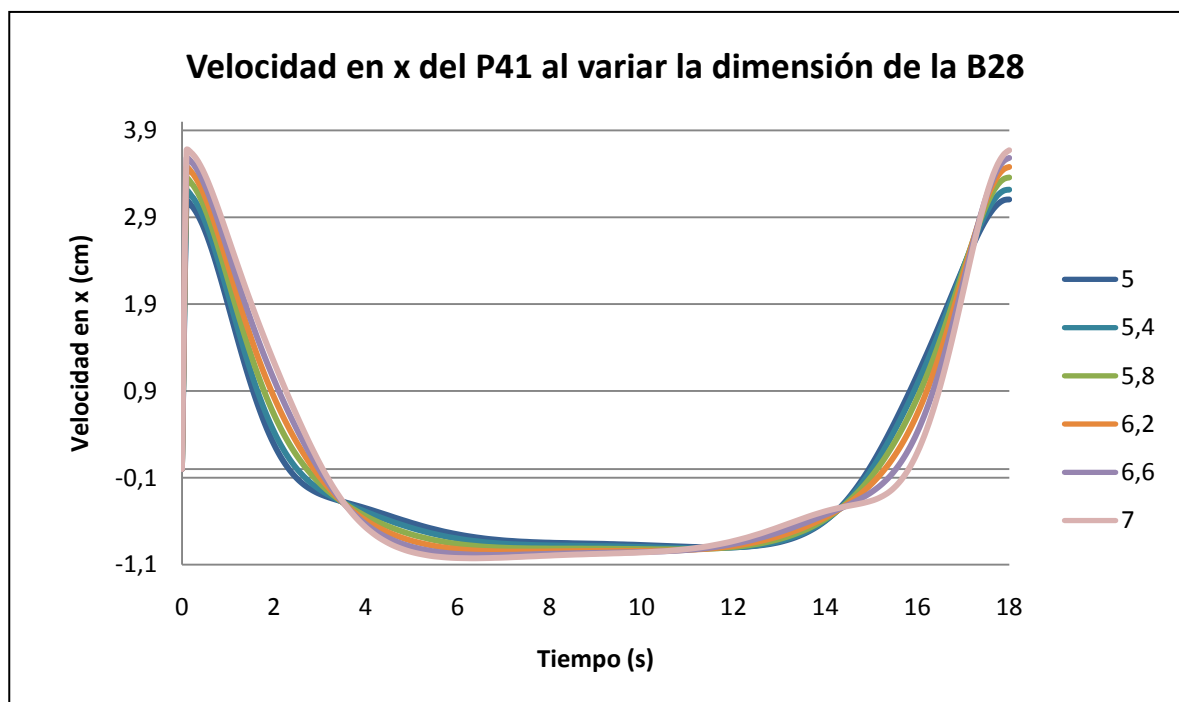
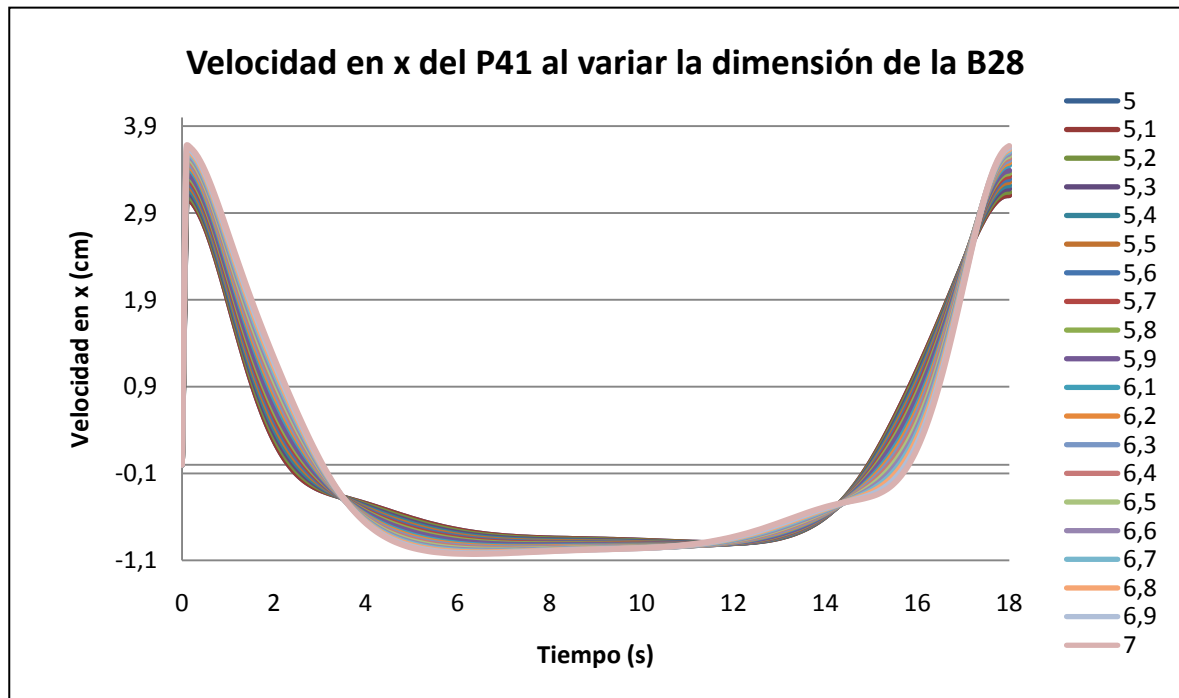
A mayor dimensión de la barra, se produce una menor posición en el eje de abscisas. Se puede apreciar un aumento proporcional de las velocidades a medida que se aumenta el tamaño de las barras.

BARRA 28



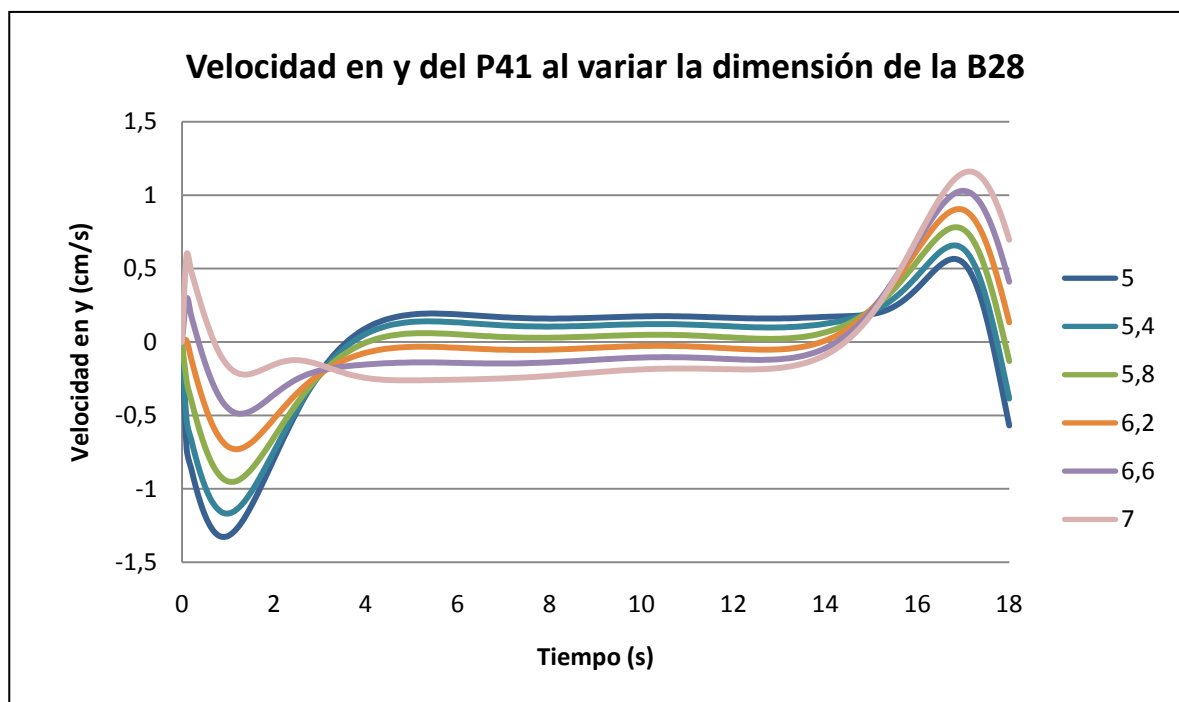
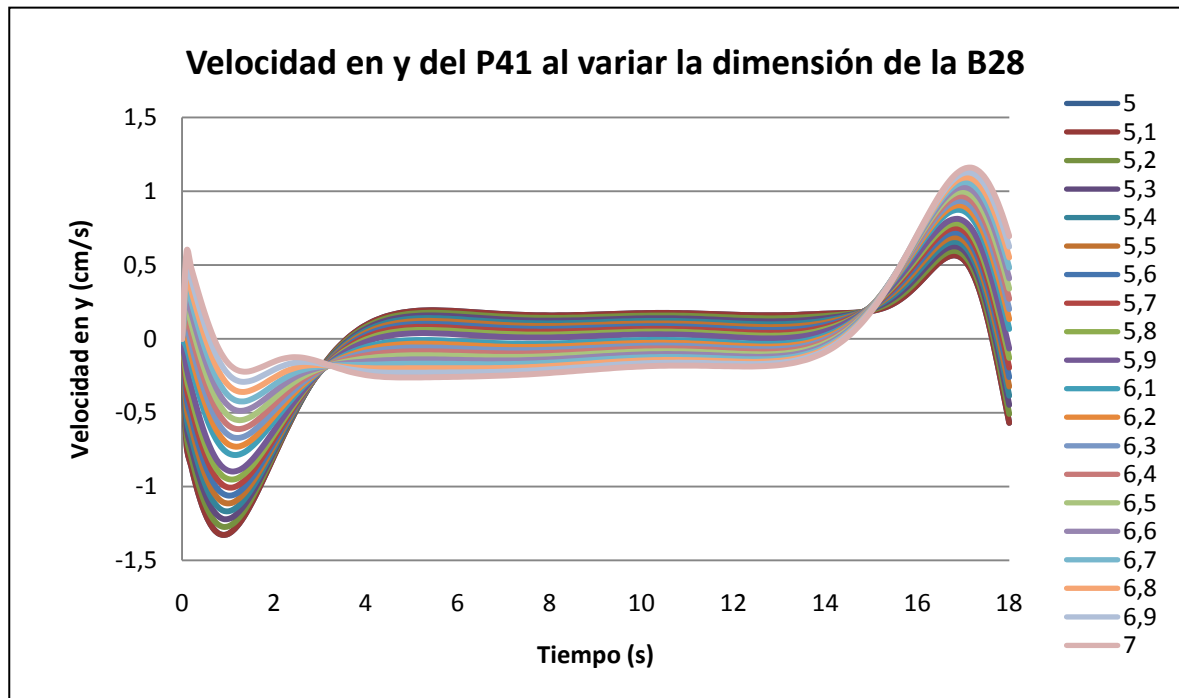
A mayor dimensión de la barra, se obtiene una menor posición en el eje y. Para una dimensión menor a 5,8 cm, la gráfica evoluciona de forma diferente, no siguiendo el patrón tomado por el resto de barras de mayor tamaño.

BARRA 28



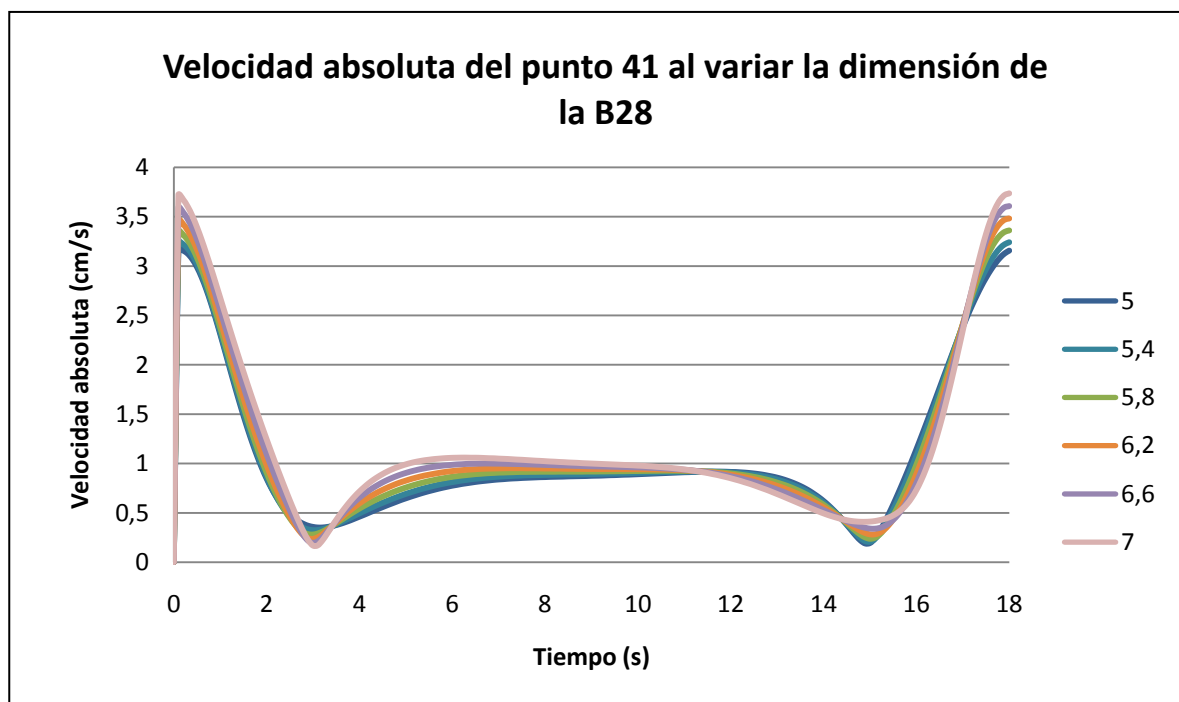
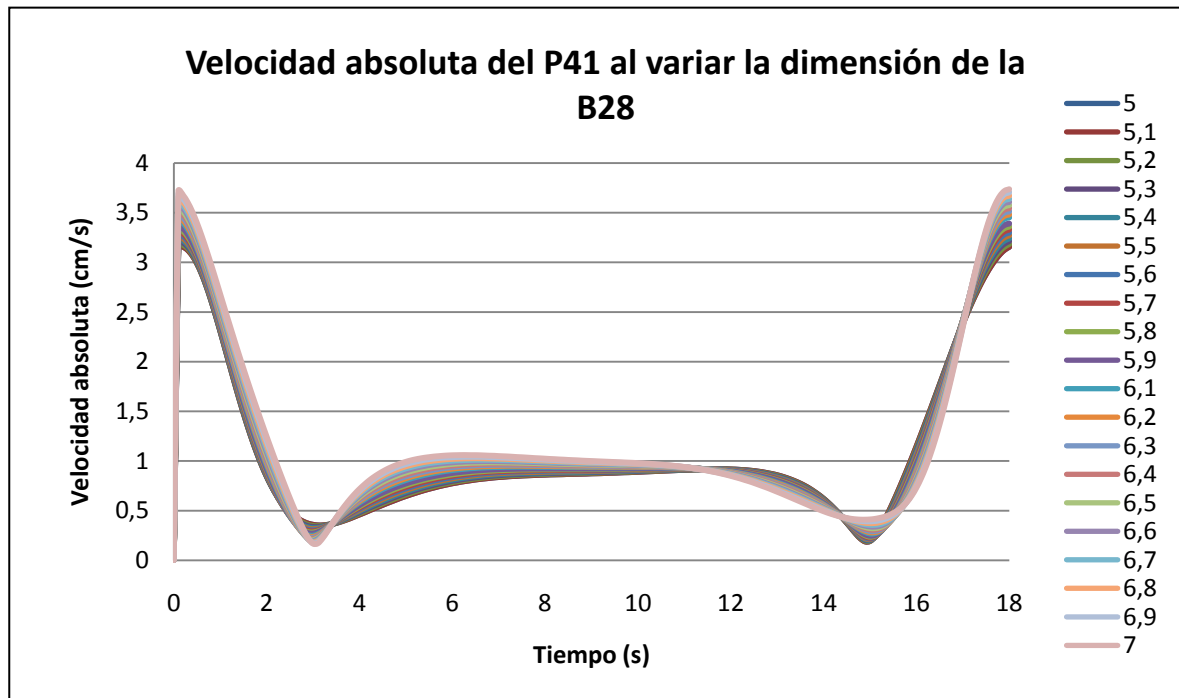
En esta ocasión, para los distintos tamaños de barra, se obtiene prácticamente la misma velocidad en x. Se aprecia también cierta simetría en el eje de ordenadas en 9 segundos. Para los instantes de tiempo 3, 11, 15 y 17 segundos las velocidades coinciden independientemente de la dimensión de las barras.

BARRA 28



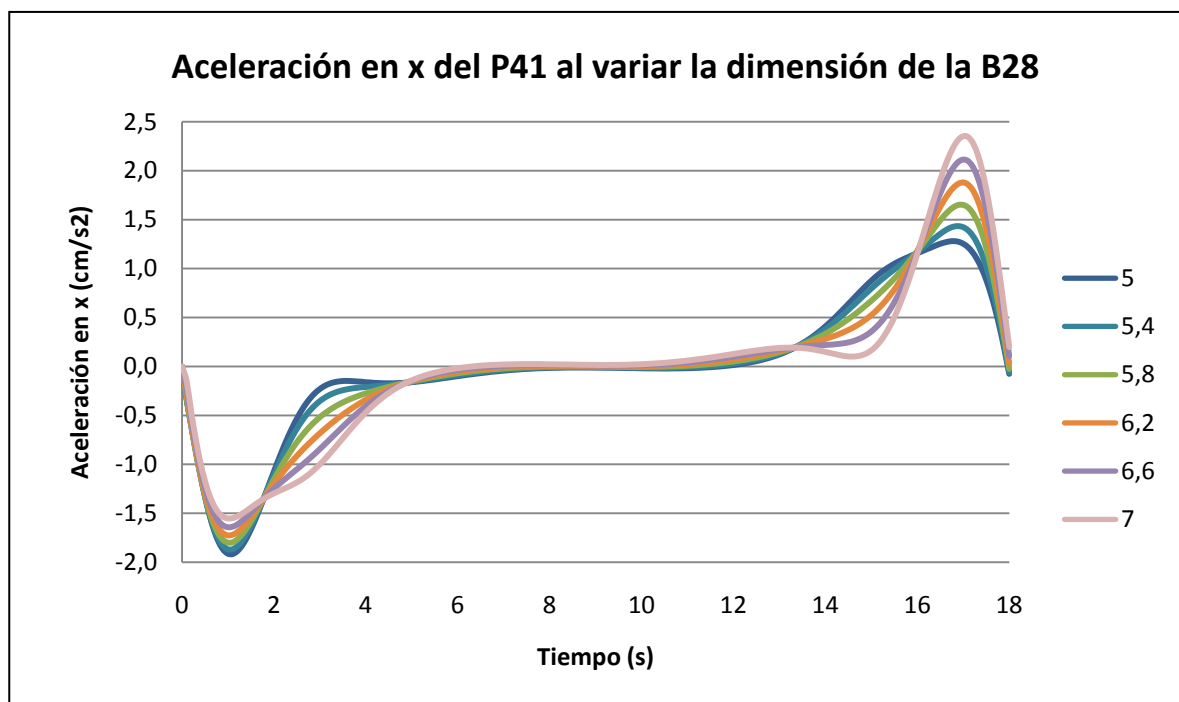
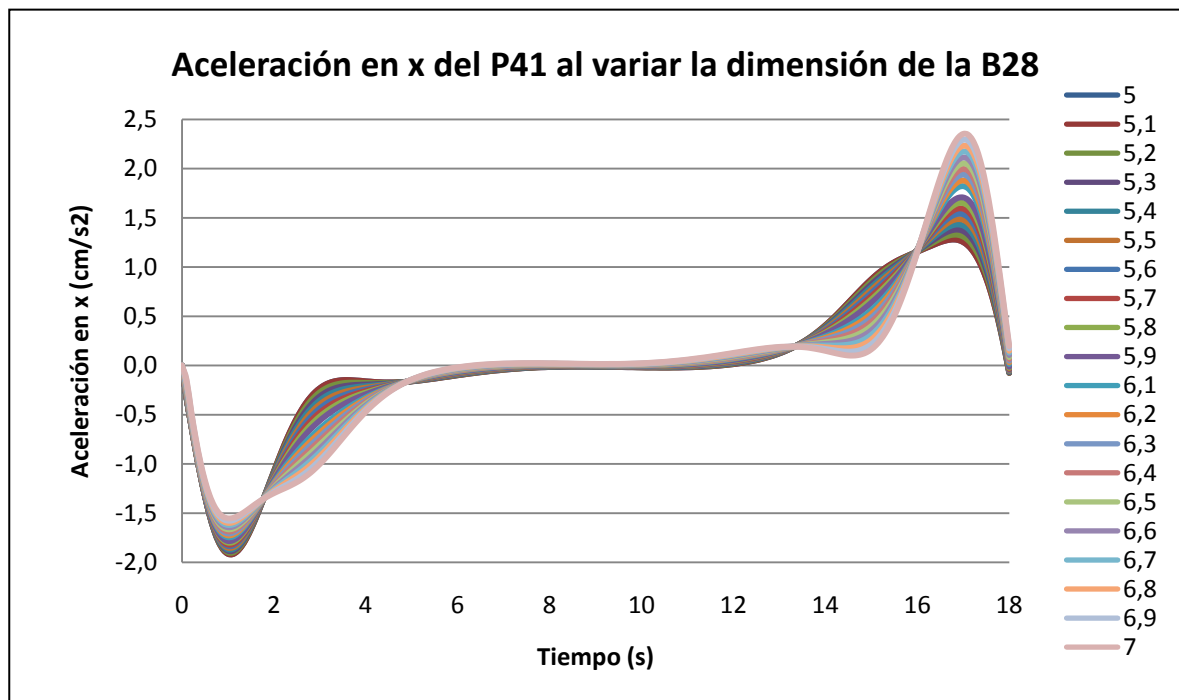
Se pueden dividir los resultados en 3 intervalos de tiempo para su análisis. El primero sería $[0,3]$, donde a menor tamaño de barra, mayor velocidad; $[3,15]$, donde las velocidades son más similares; y $[15,18]$, donde se aprecia que para dimensiones de la barra mayor, hay una velocidad también mayor.

BARRA 28



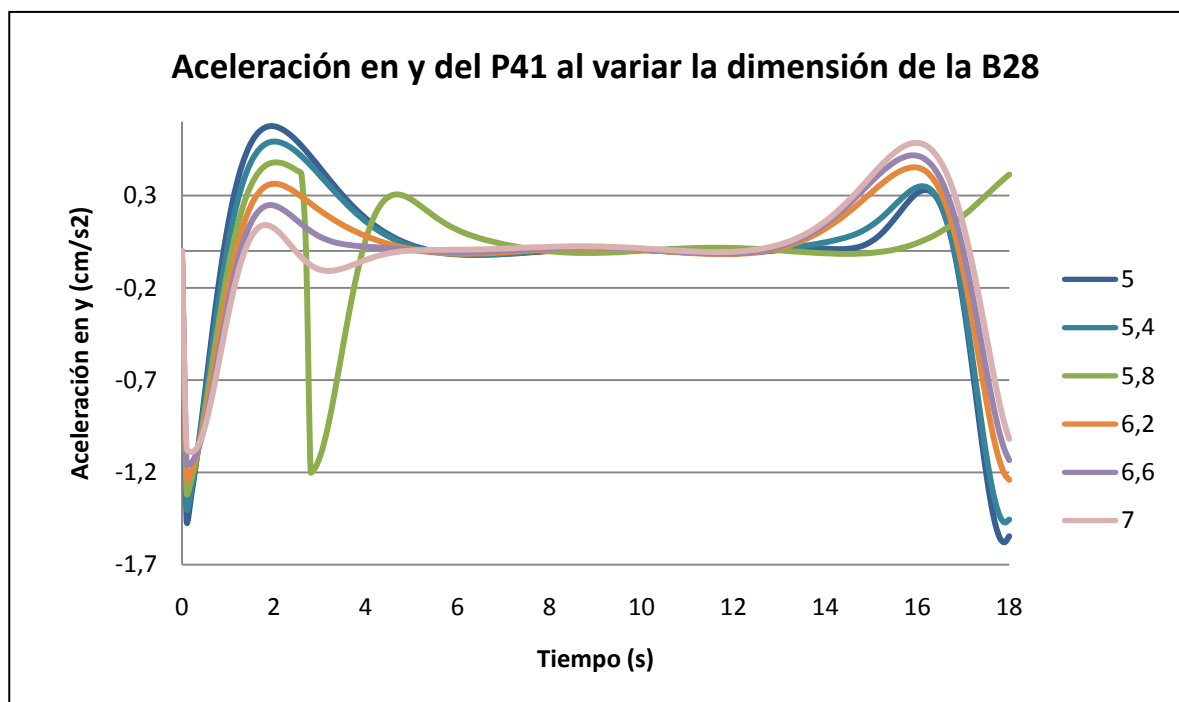
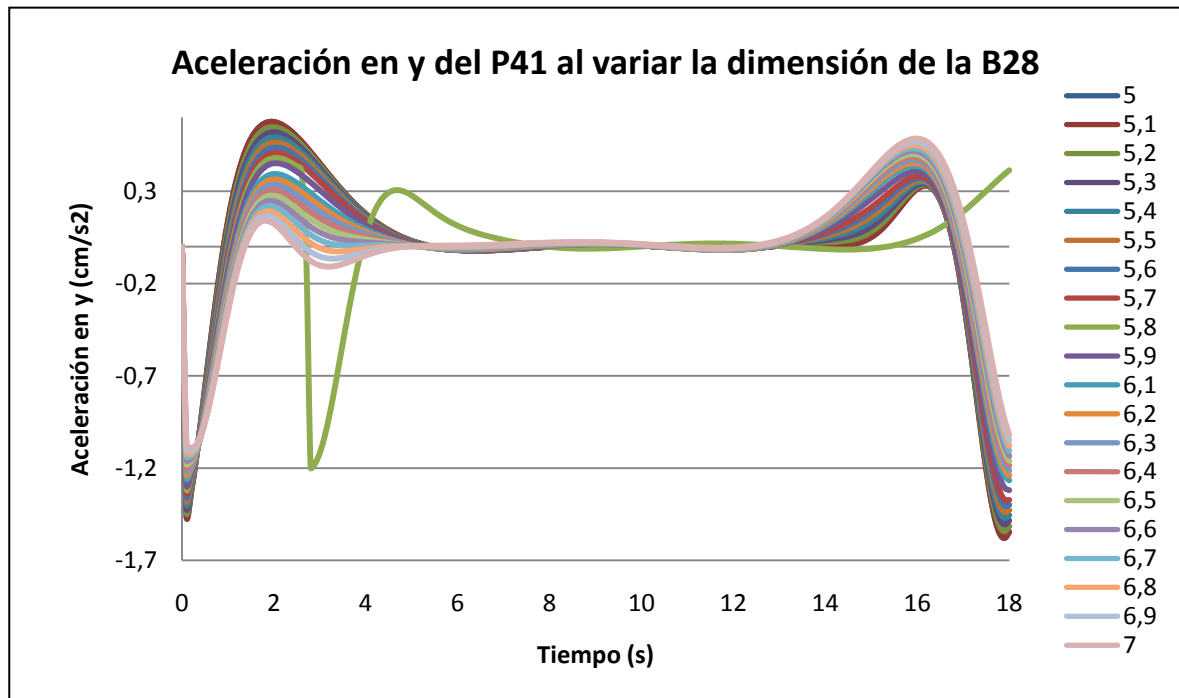
Se aprecian dos picos en la gráfica: el primero, para un instante de 3 segundos, producido por la barra de mayor dimensión; y el segundo, para un instante de 15 segundos, producido por la barra de menor dimensión. Para los instantes de tiempo 3.5, 13.5 y 17 las velocidades coinciden independientemente de la dimensión de las barras.

BARRA 28



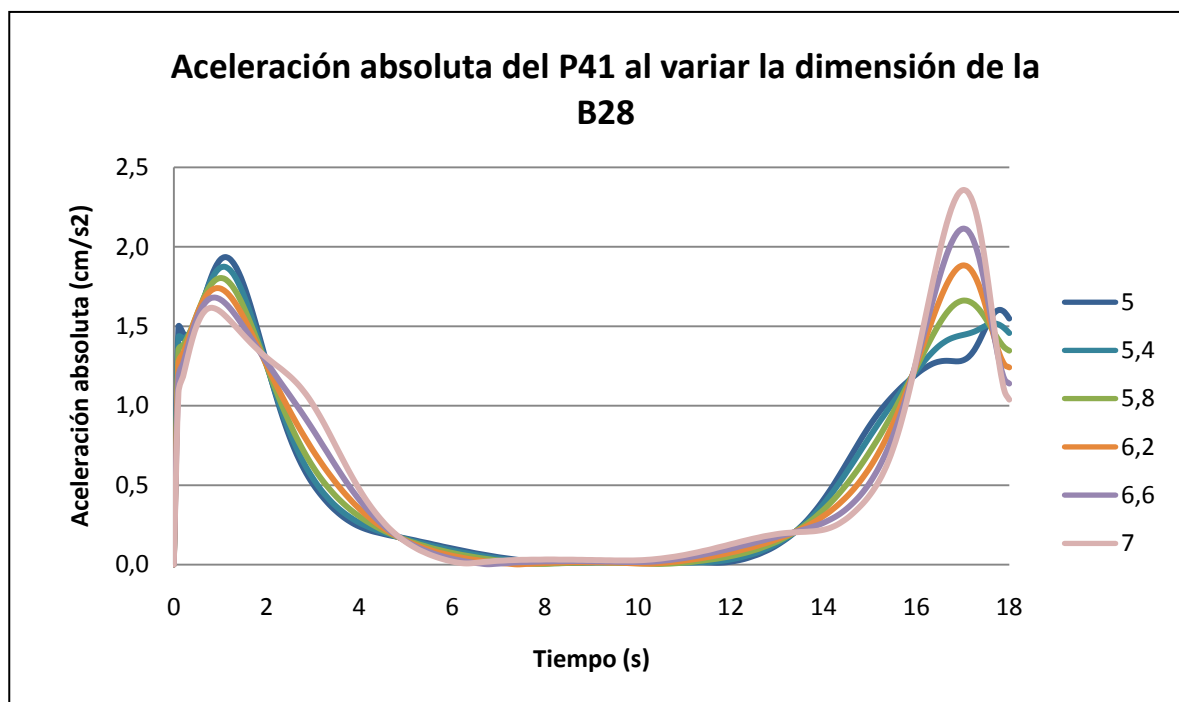
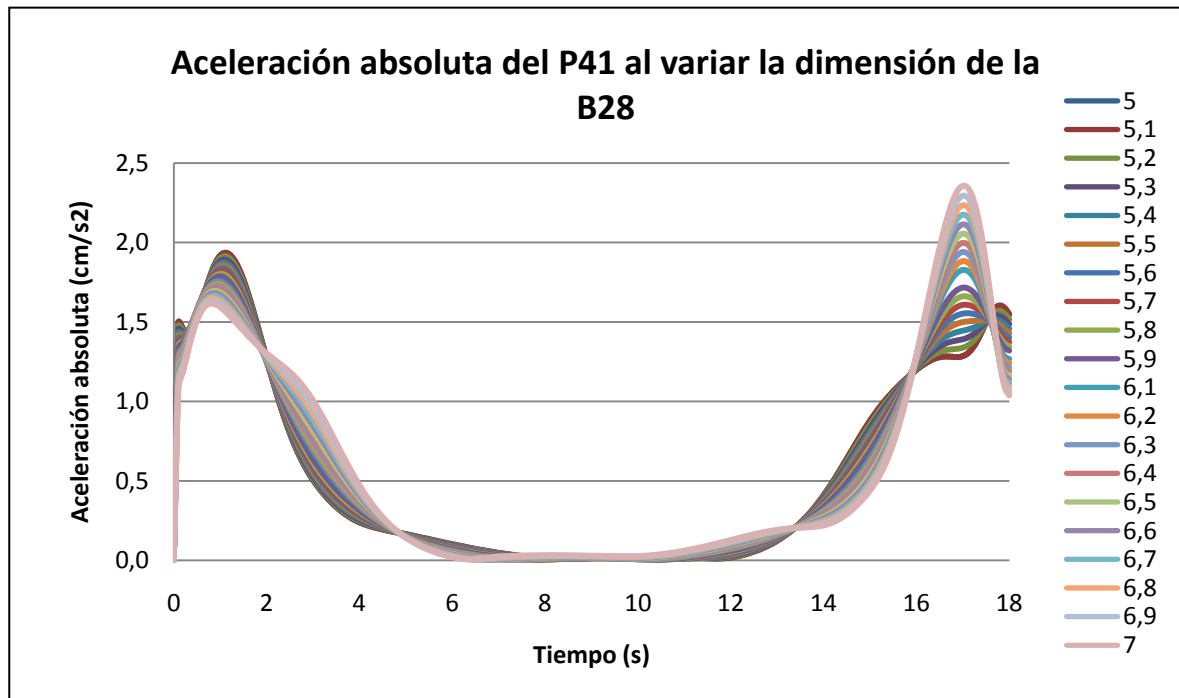
En el intervalo [5, 14] las aceleraciones obtenidas son independientes del tamaño de la barra. El resto se puede dividir en 4 intervalos para realizar un mejor estudio: [0,2] y [13,16] donde a menor dimensión de la barra se dispone de una aceleración mayor; y [2,5] y [16,18] donde a mayor tamaño de las barras hay más aceleración.

BARRA 28



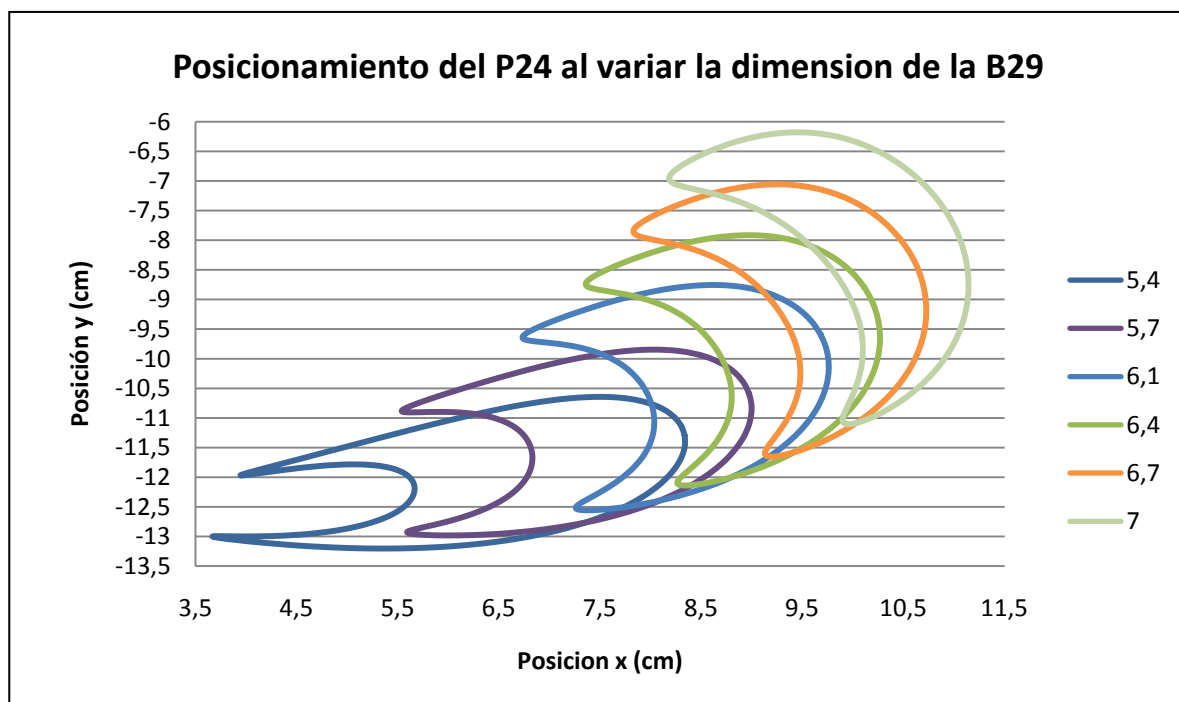
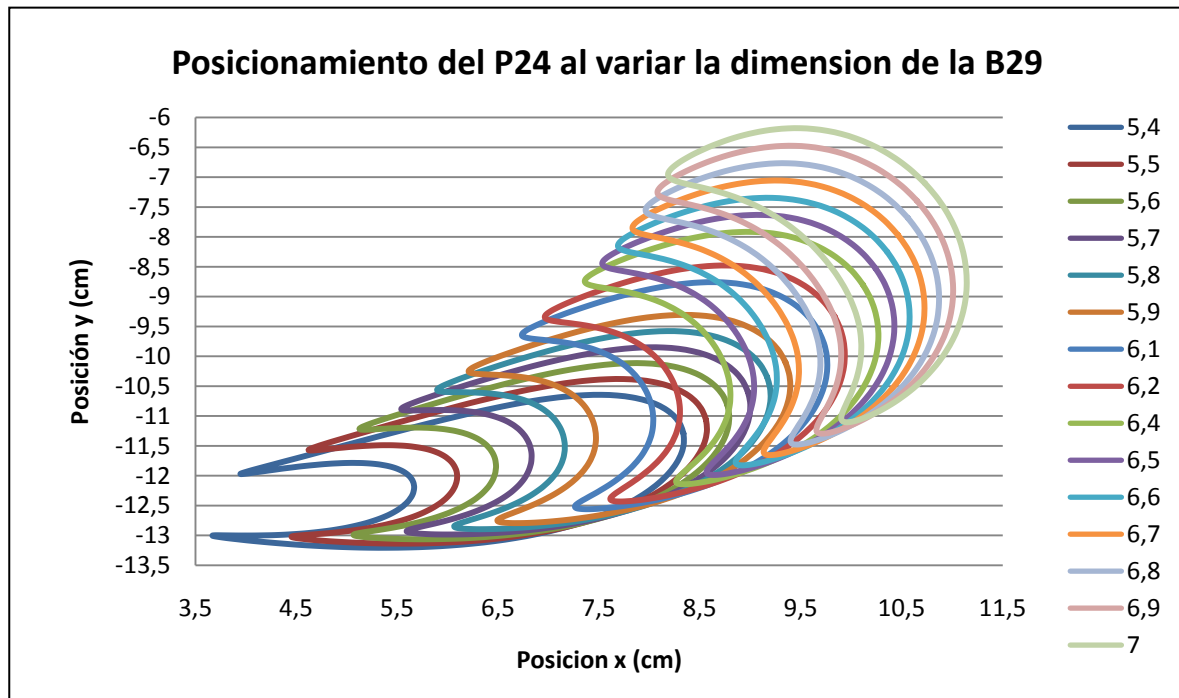
Las aceleraciones obtenidas son parecidas salvo para la barra de 5,8 cm, cuyos resultados no siguen la tendencia del resto. Se aprecia un máximo para un tiempo de 2 segundos, provocado por la barra de menor dimensión; y otro máximo para un tiempo de 16 segundos, provocado por la barra de mayor dimensión.

BARRA 28



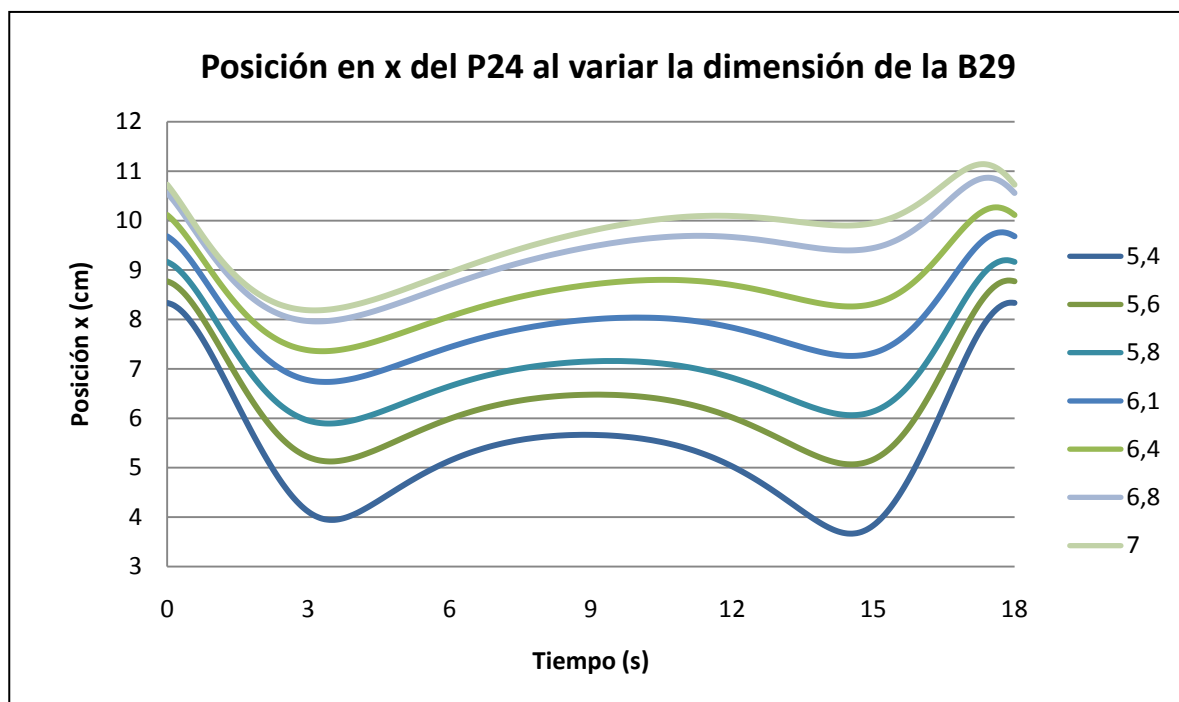
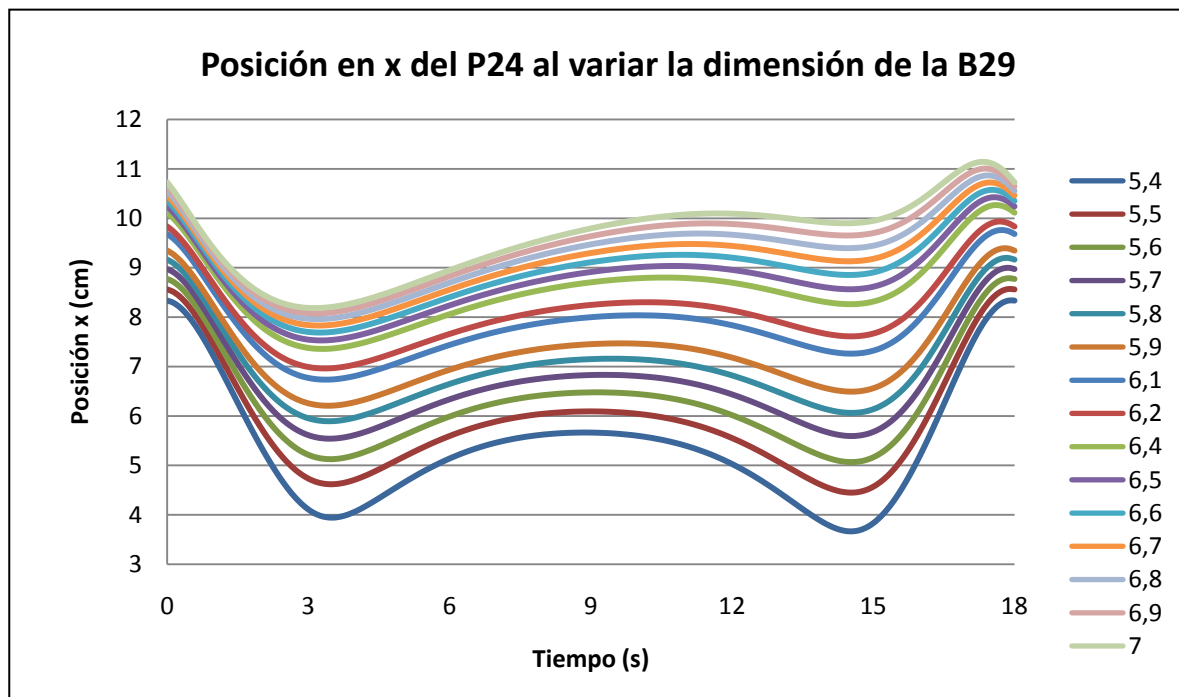
Las aceleraciones obtenidas no guardan mucha diferencia respecto a las distintas barras, a excepción del intervalo [16,18] donde se produce la mayor diferencia de aceleración en un instante de tiempo, llegando esta a los 2 cm/s^2 entre la menor y la mayor de las barras.

BARRA 29



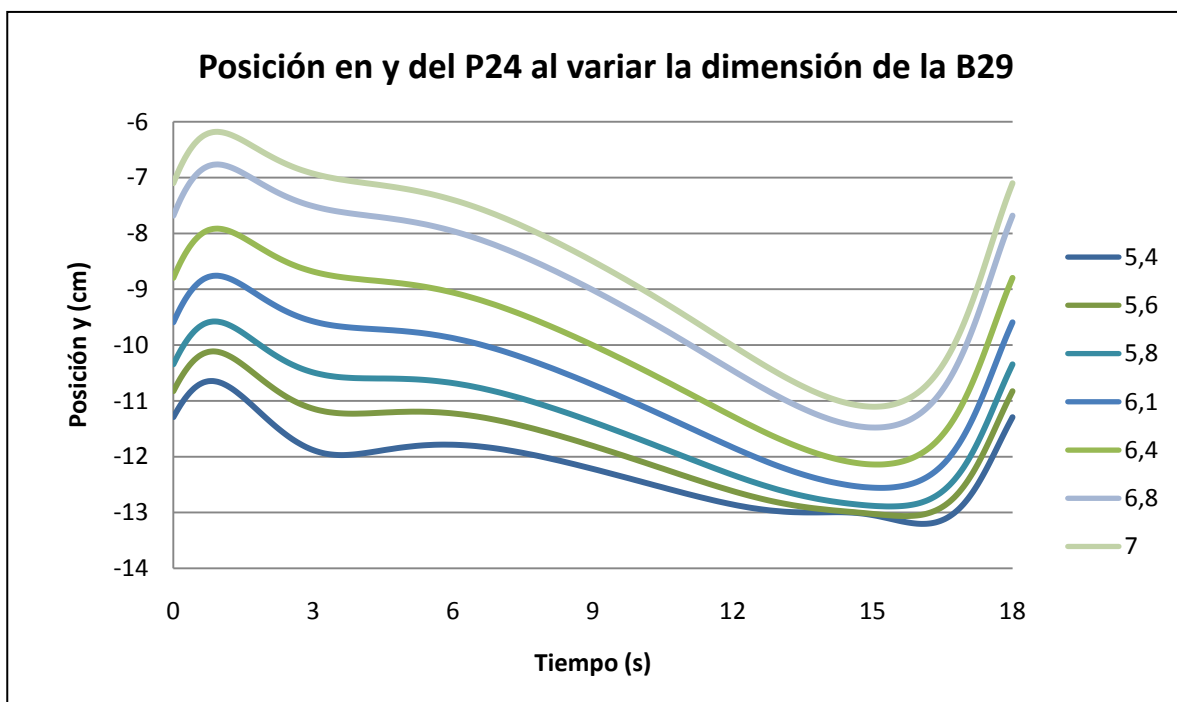
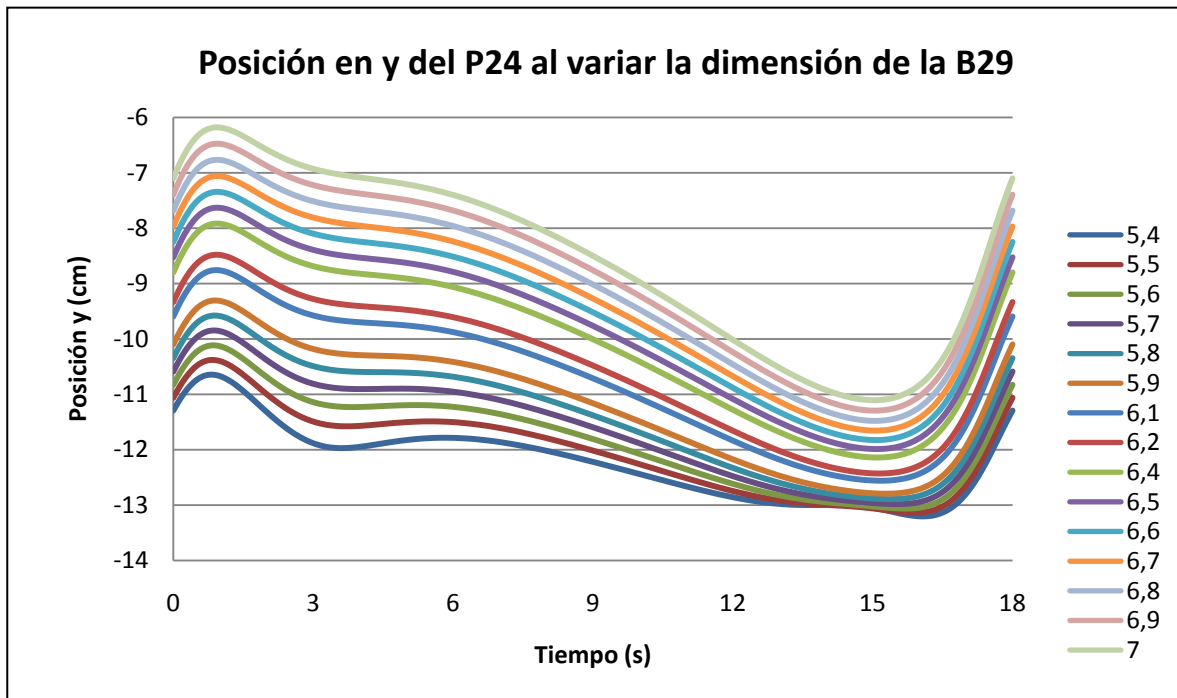
En esta gráfica quedan reflejados los distintos perfiles de posición para cada una de las barras.

BARRA 29



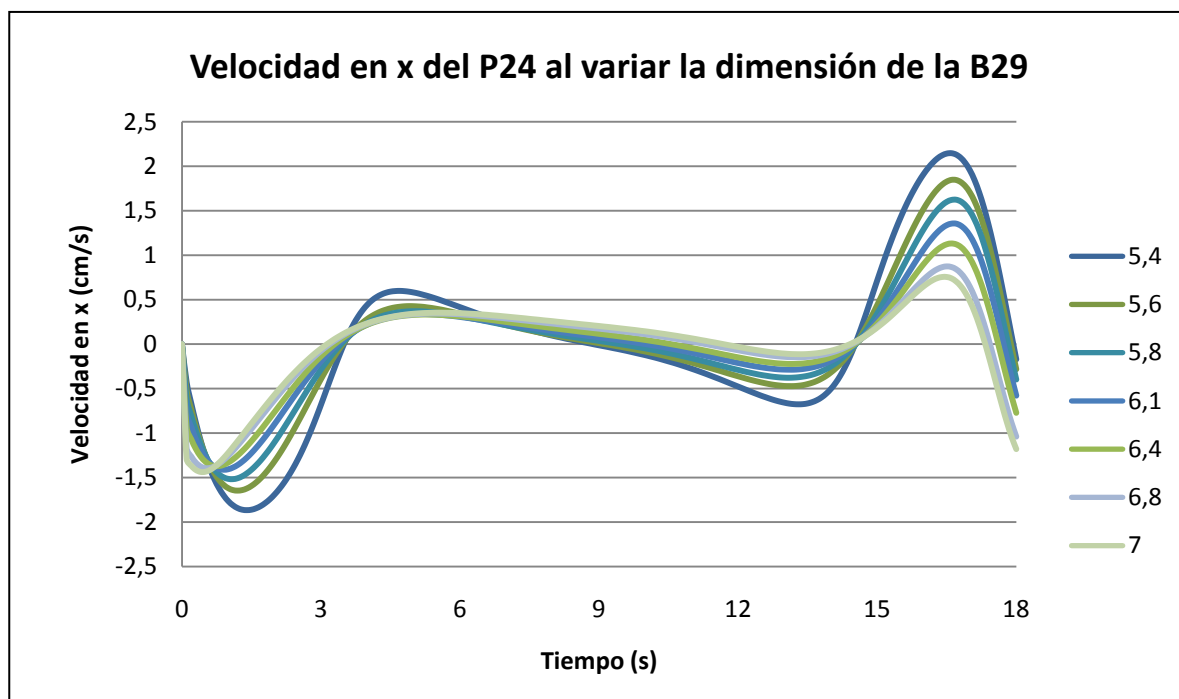
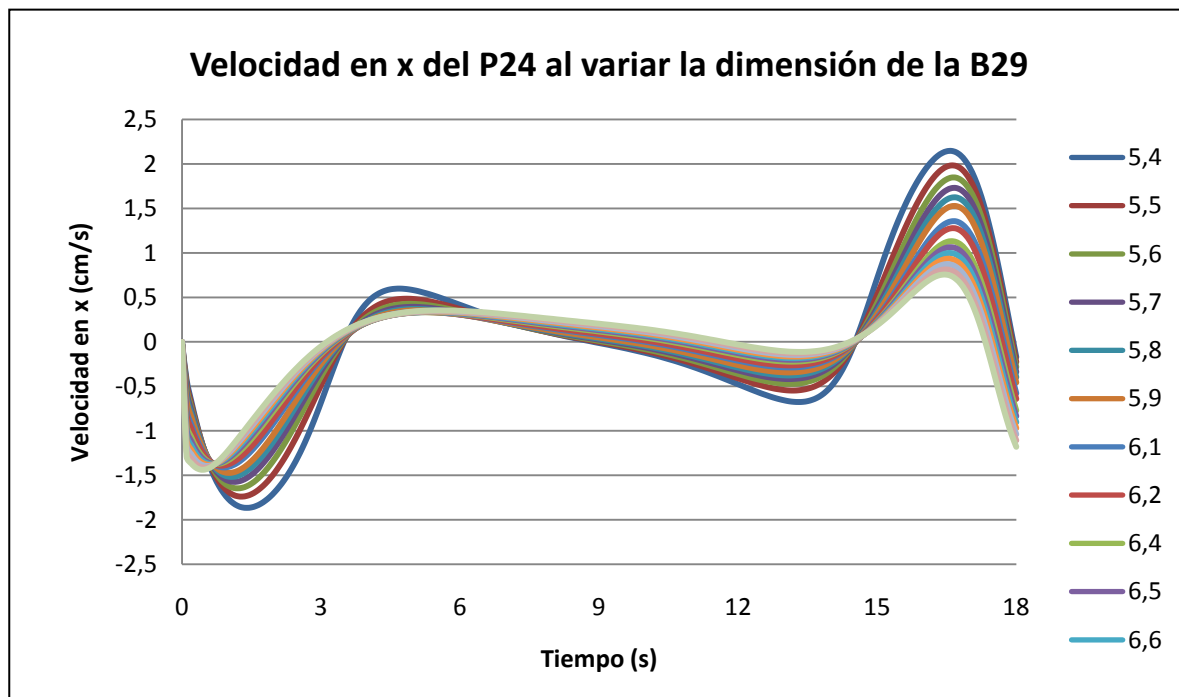
La posición en el eje de abscisas aumenta con el paso de tiempo a medida que aumenta el tamaño de las barras.

BARRA 29



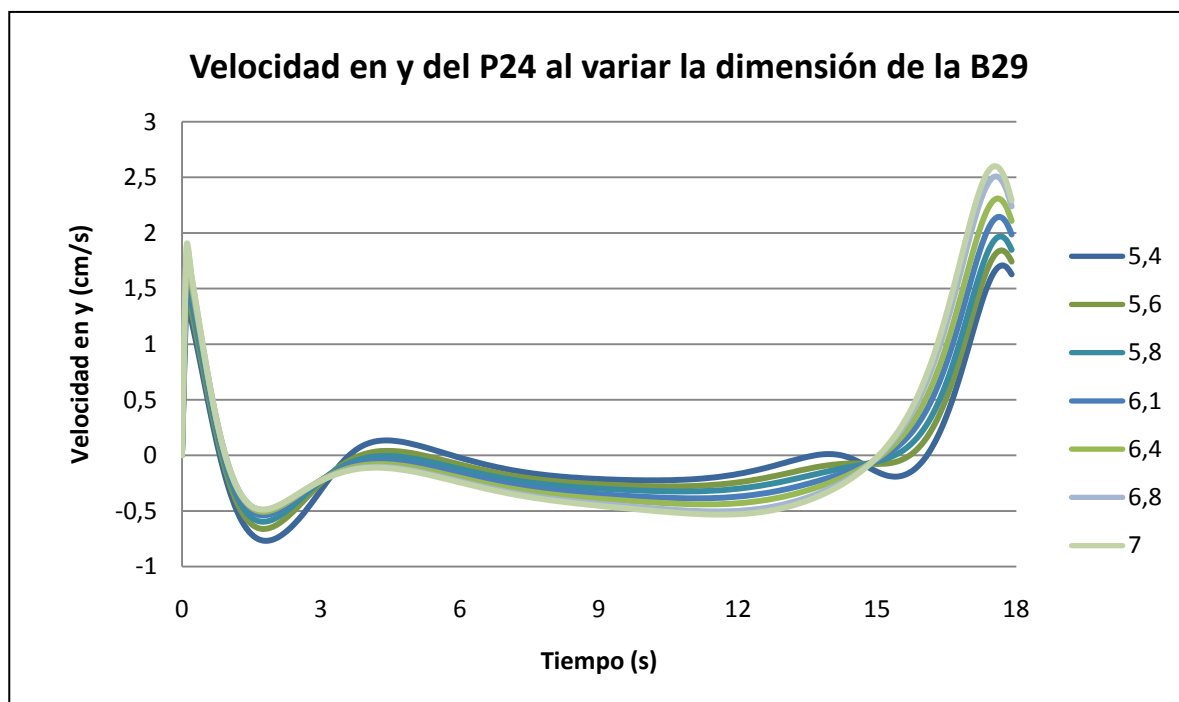
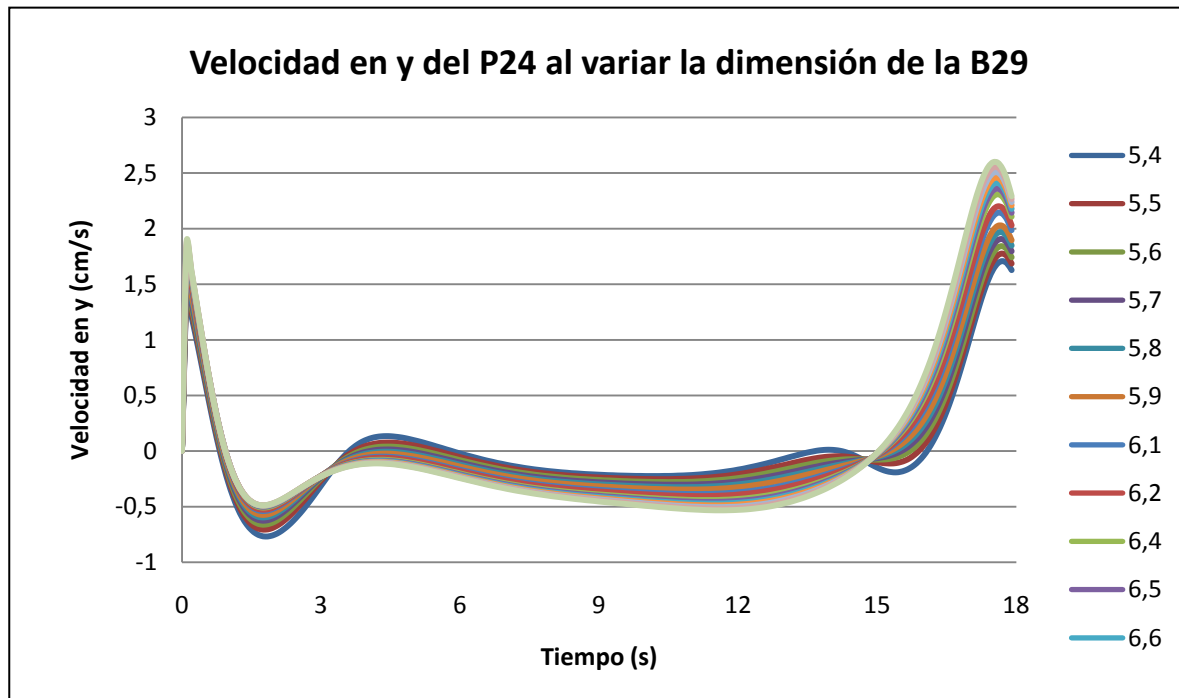
La posición en el eje de ordenadas aumenta con el paso de tiempo a medida que aumenta el tamaño de las barras.

BARRA 29



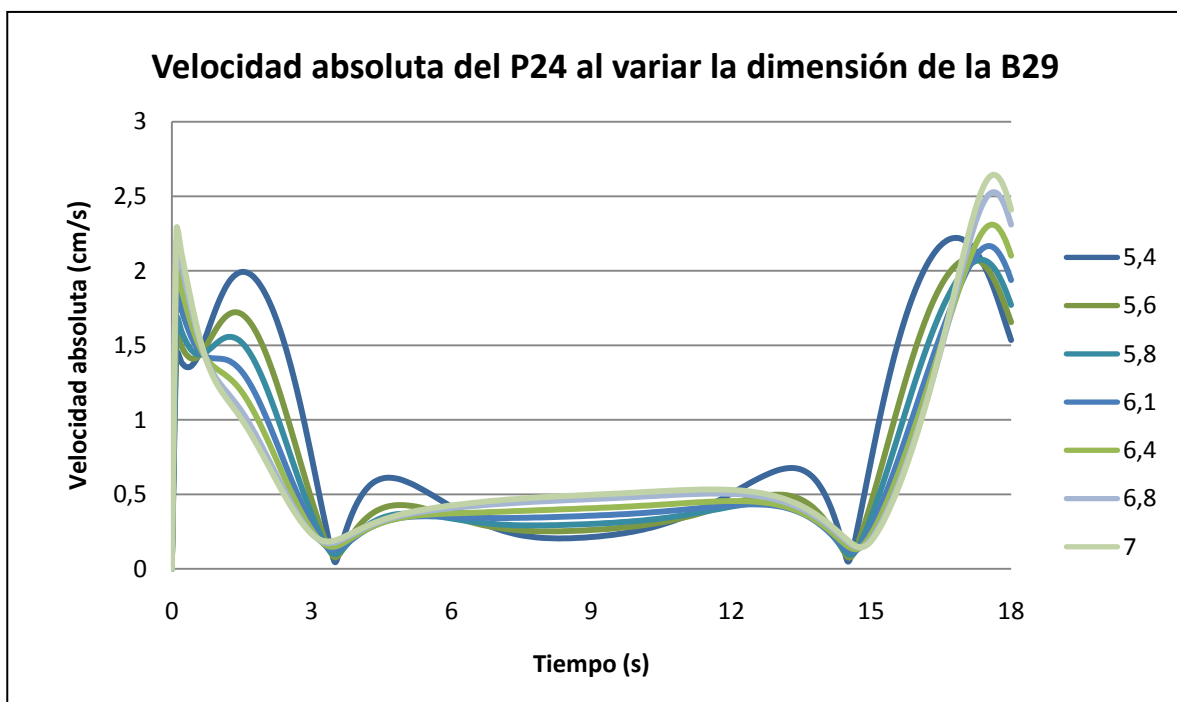
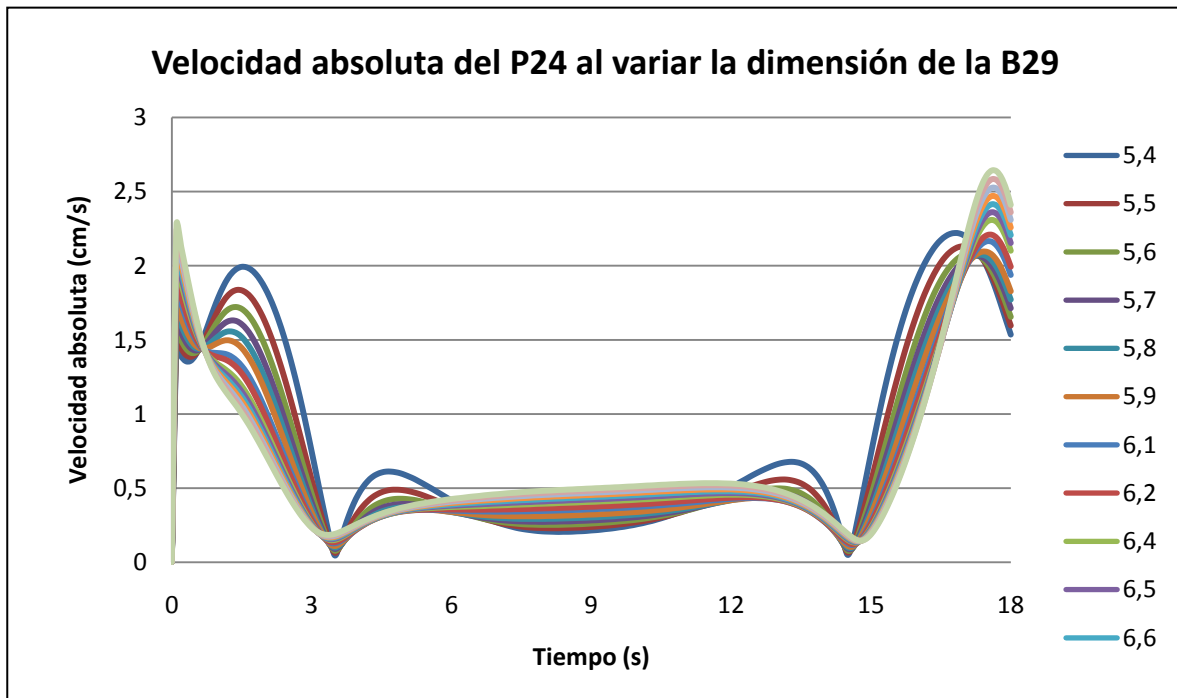
La velocidad respecto al tiempo es muy pareja en el intervalo estudiado excepto para tamaños inferiores de la barra a 5,8 cm, donde la gráfica no sigue la tendencia que se muestra en el resto de las barras. Para un instante de tiempo de 16 segundos se produce la mayor diferencia de velocidades entre la mayor y menor de las barras. Para los instantes de tiempo de 1, 4 y 15 segundos todas las velocidades coinciden independientemente del tamaño de la barra.

BARRA 29



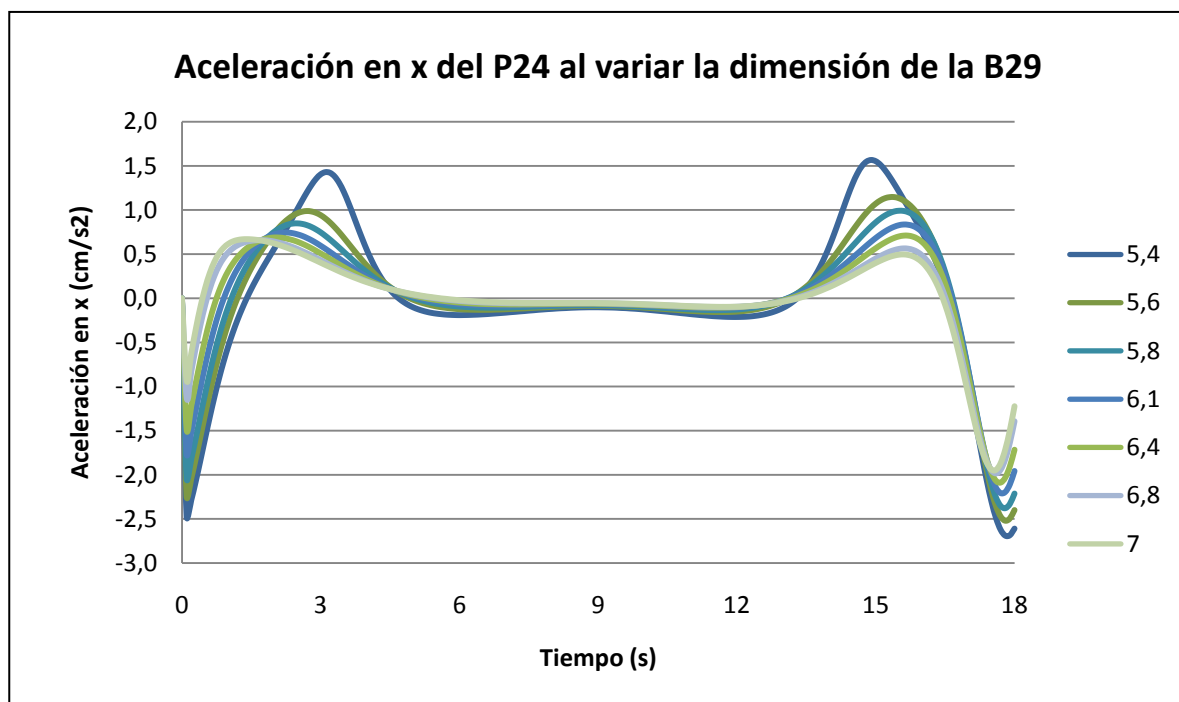
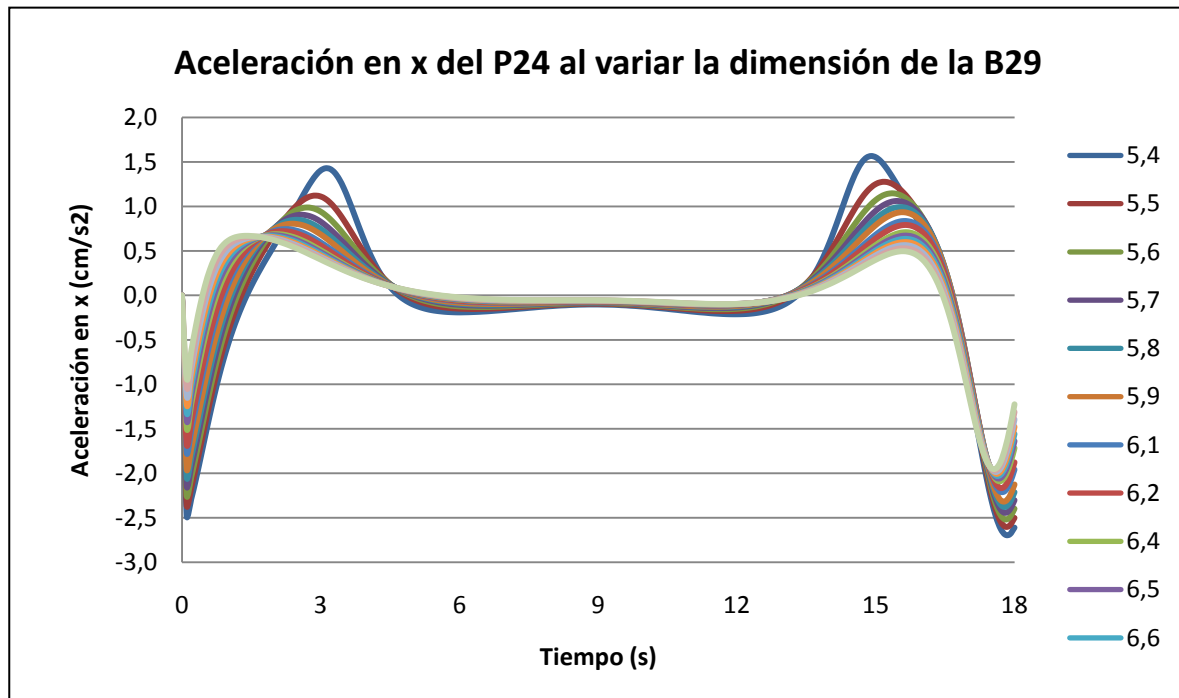
Las velocidades para barras de tamaño mayor a 5,6 cm son muy parecidas. La mayor diferencia está situada aproximadamente en el instante 17 segundos, aumentando en este instante la velocidad a medida que aumenta la dimensión de la barra. Para los instantes 4 y 15 segundos las velocidades coinciden independientemente del tamaño de las barras.

BARRA 29



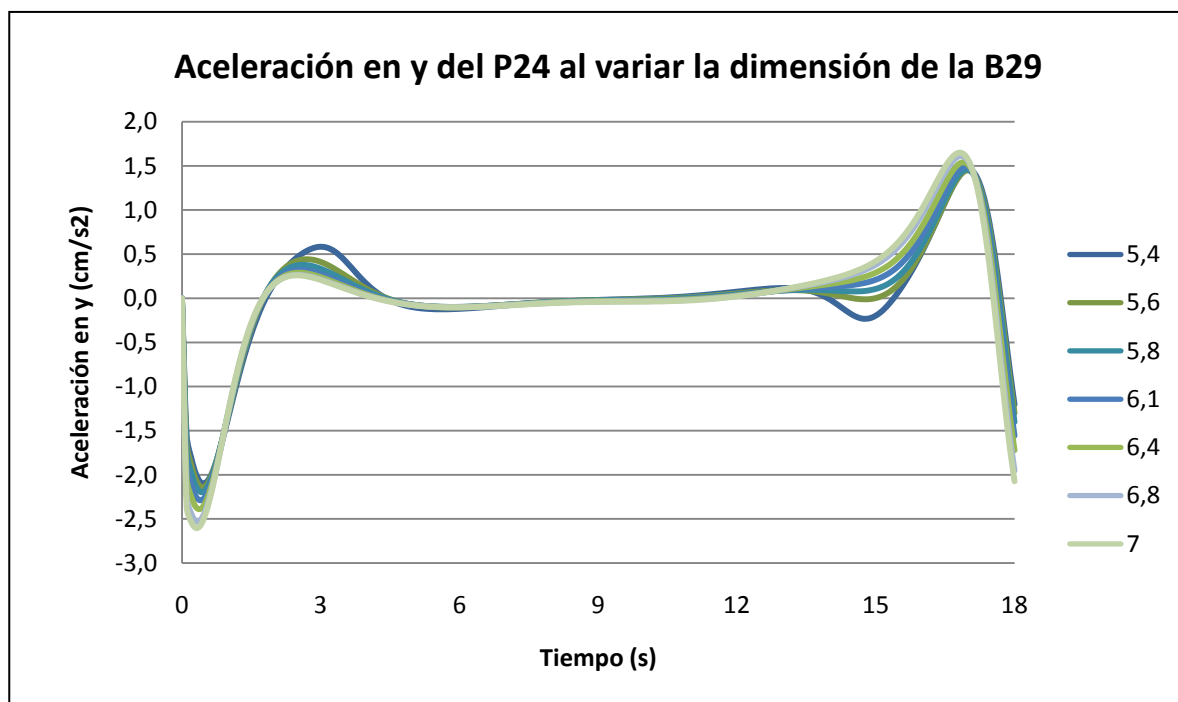
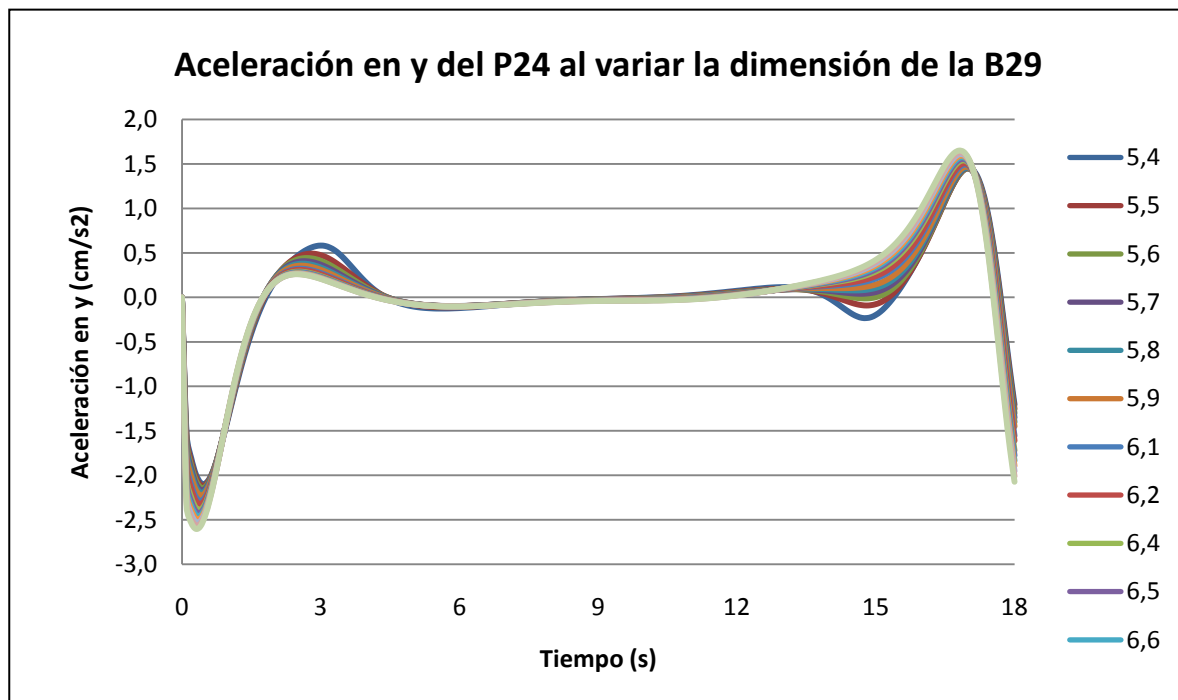
Los resultados obtenidos para la velocidad absoluta muestran unos picos en los instantes de tiempo de 3.5 y 14.5, que corresponden a la barra de menor tamaño. Conforme mayor sea la barra, la velocidad absoluta toma unos valores más suaves.

BARRA 29



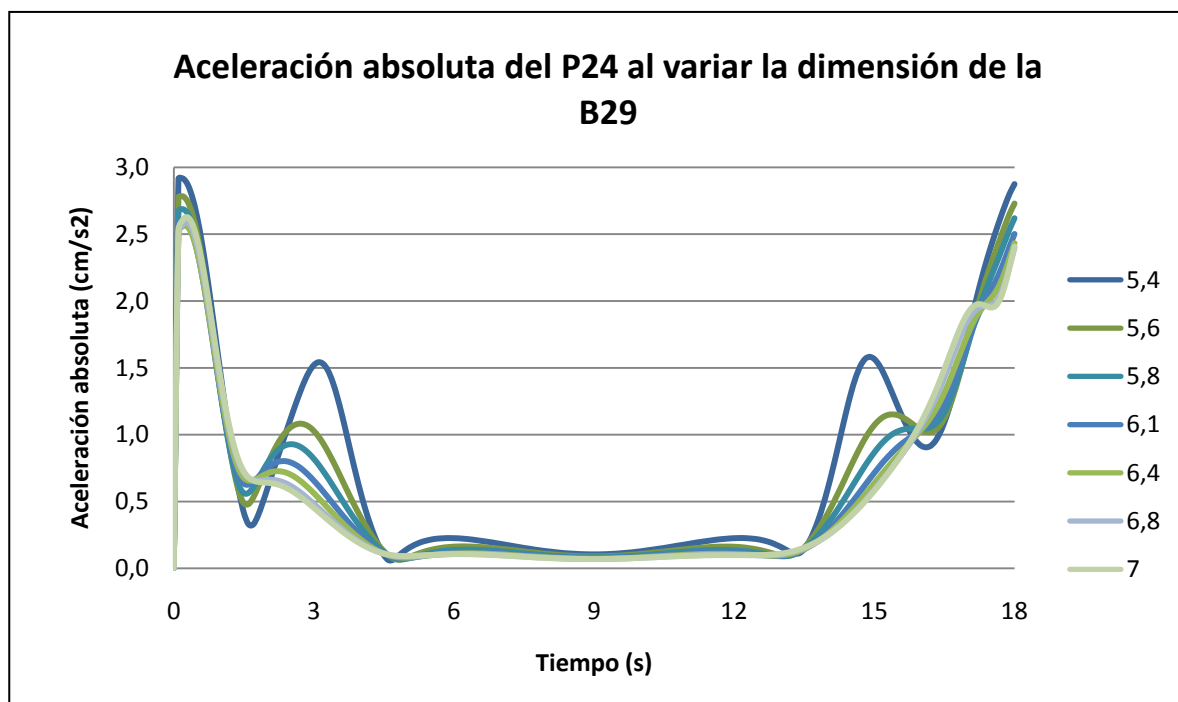
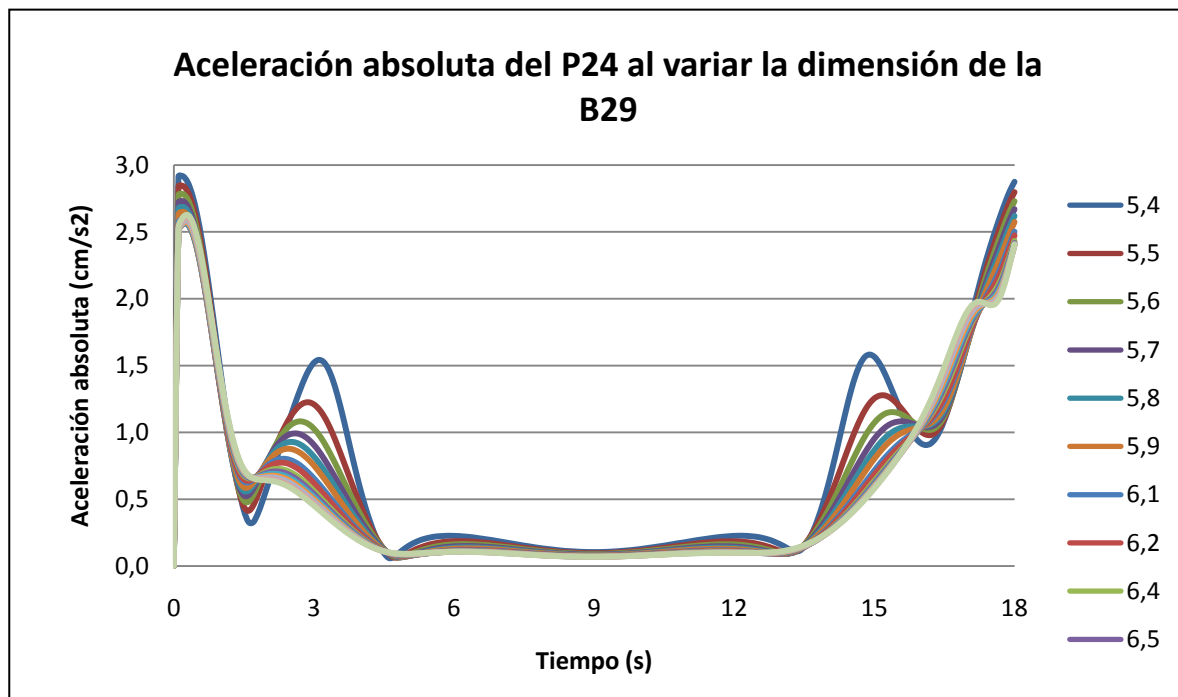
La aceleración obtenida en el tiempo de estudio es muy parecida para tamaños de las barras superiores a 5,8 cm. Se observa que las barras de mayor tamaño presentan unos resultados más suavizados, sin llegar a los máximos o mínimos tan pronunciados obtenidos por las barras de menor tamaño.

BARRA 29



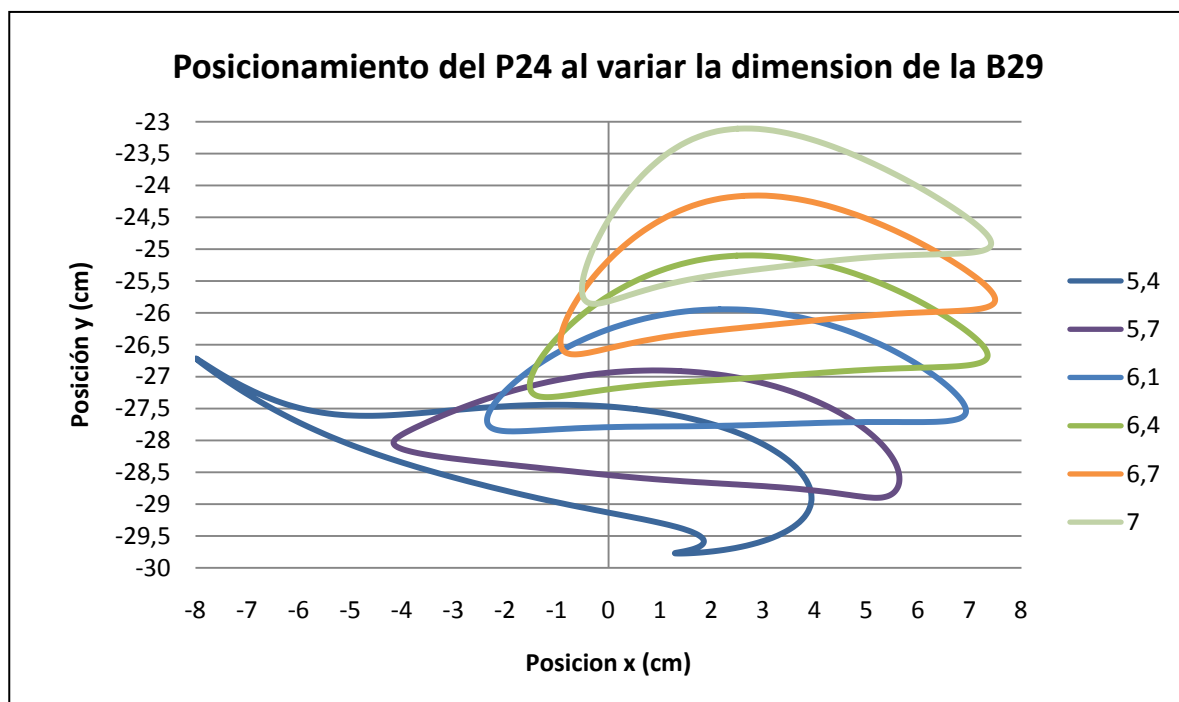
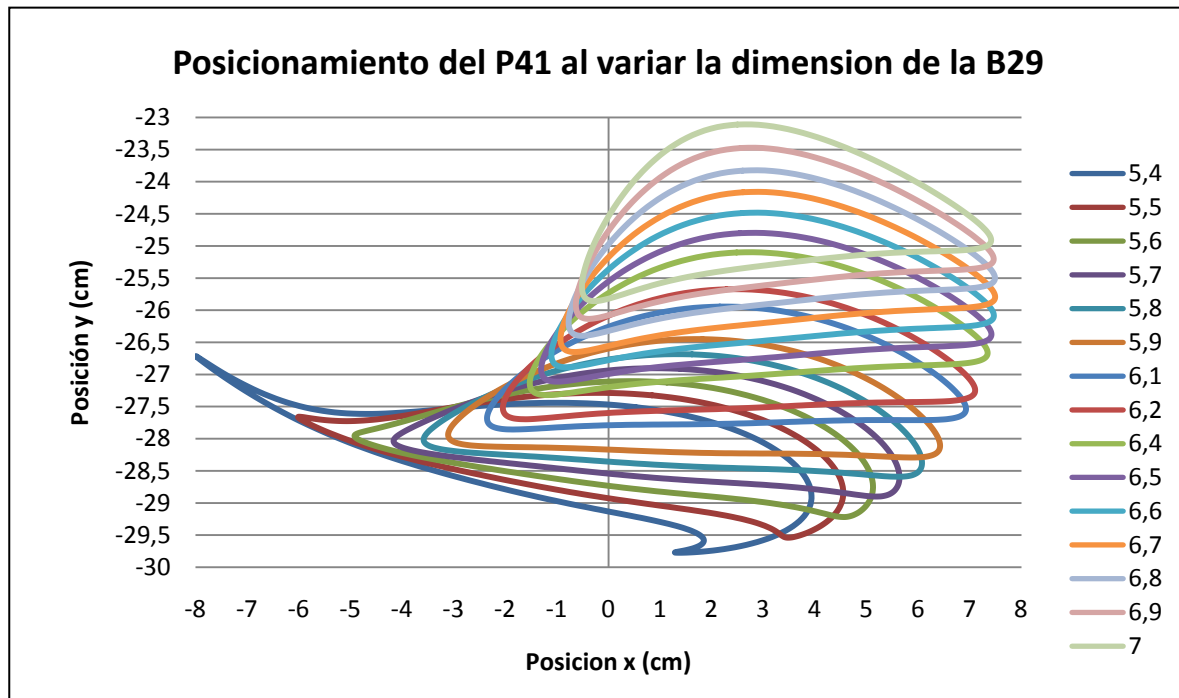
Igual que en el caso anterior, la aceleración obtenida en el tiempo de estudio es muy parecida para tamaños de las barras superiores a 5,8 cm. Para barras de mayor tamaño se obtienen unos resultados más suavizados, sin llegar a los máximos o mínimos tan pronunciados obtenidos por las barras de menor tamaño.

BARRA 29



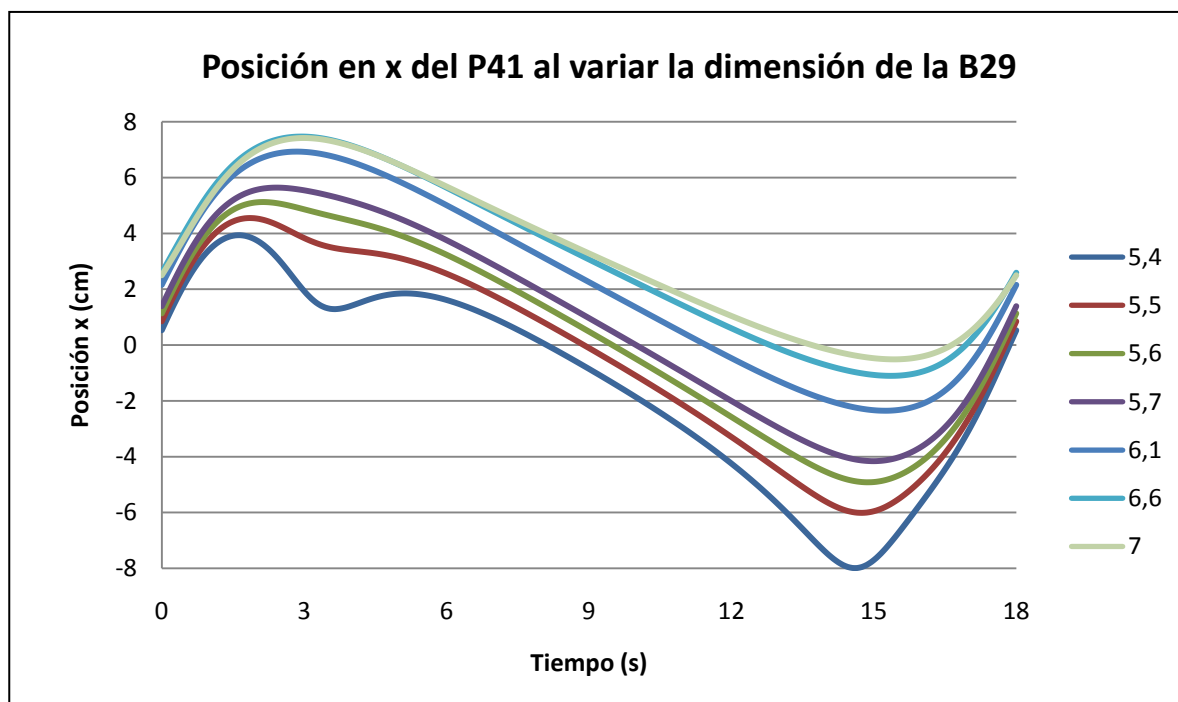
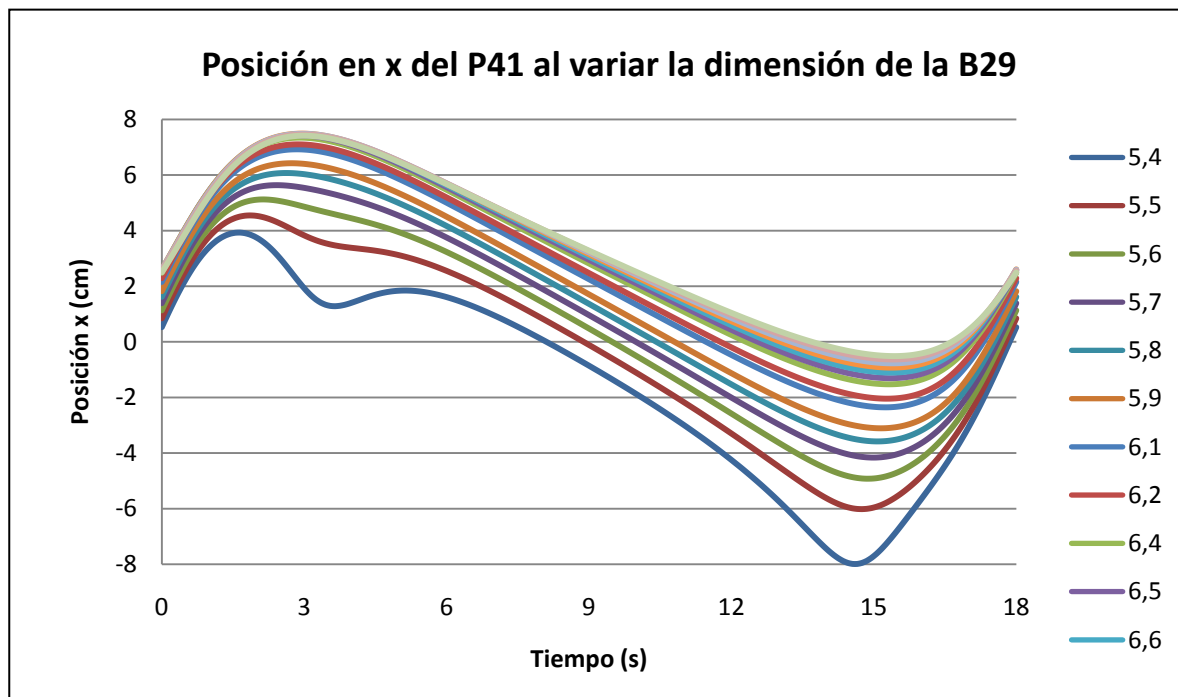
La aceleración obtenida en el tiempo de estudio es muy parecida para tamaños de las barras superiores a 5,8 cm. Para barras de mayor tamaño se obtienen unos resultados más suavizados. Destaca la aparición de máximos de velocidad en los instantes de 3 y 15 segundos para mayores tamaños de las barras.

BARRA 29



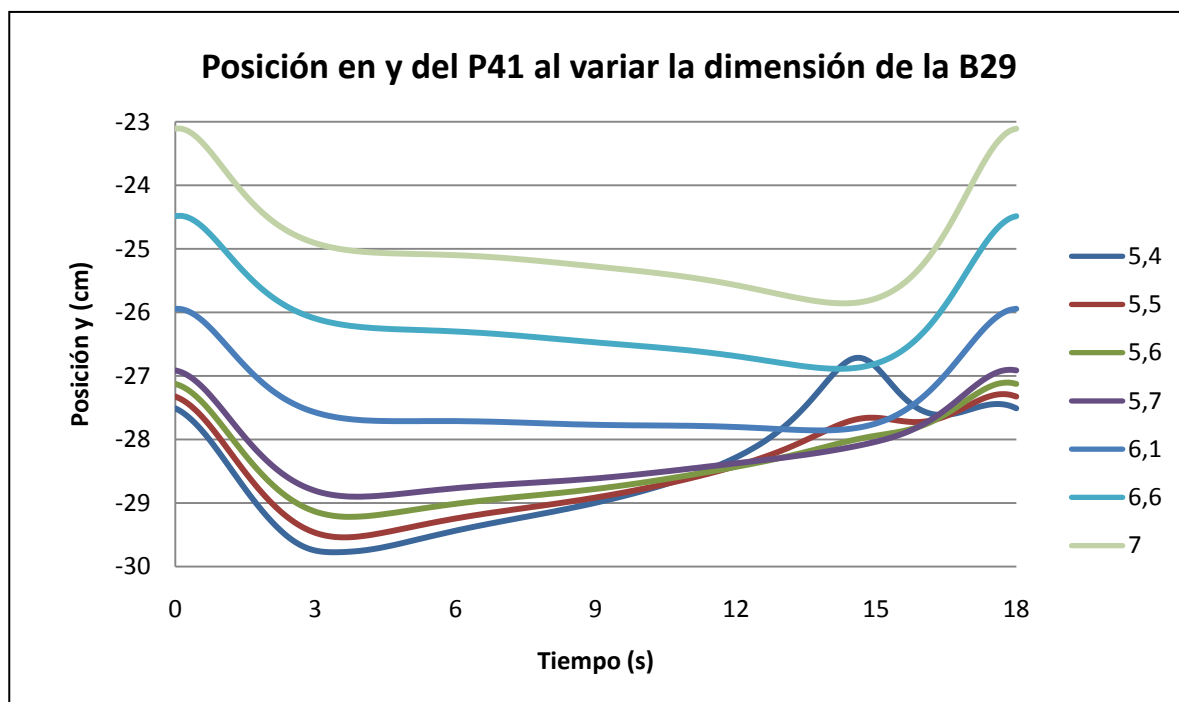
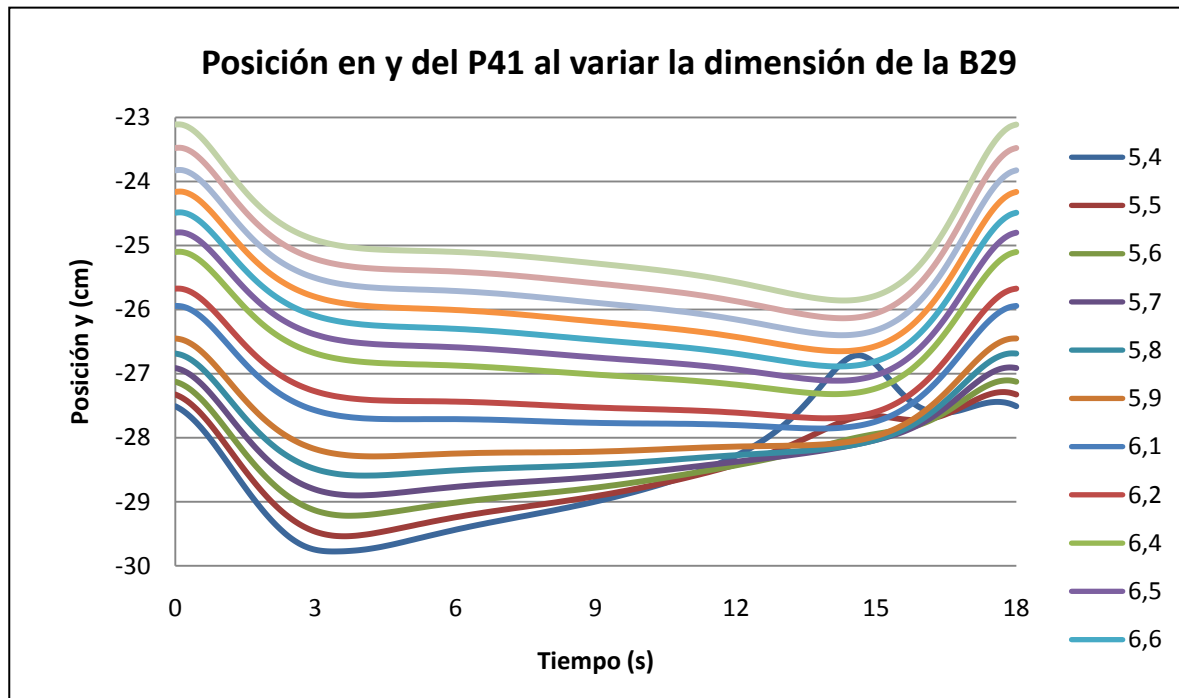
En esta gráfica quedan reflejados los distintos perfiles de posición para cada una de las barras. Para las barras de menor tamaño el perfil descrito describe una trayectoria rara respecto al resto, dando lugar incluso a varios picos.

BARRA 29



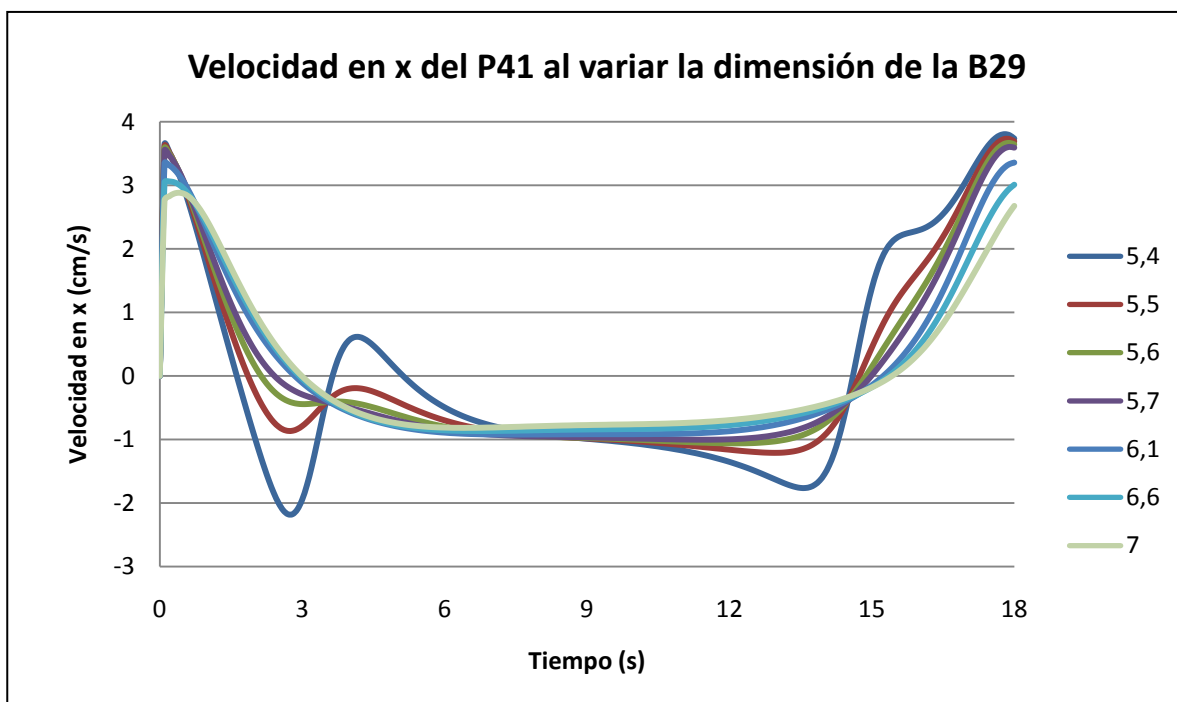
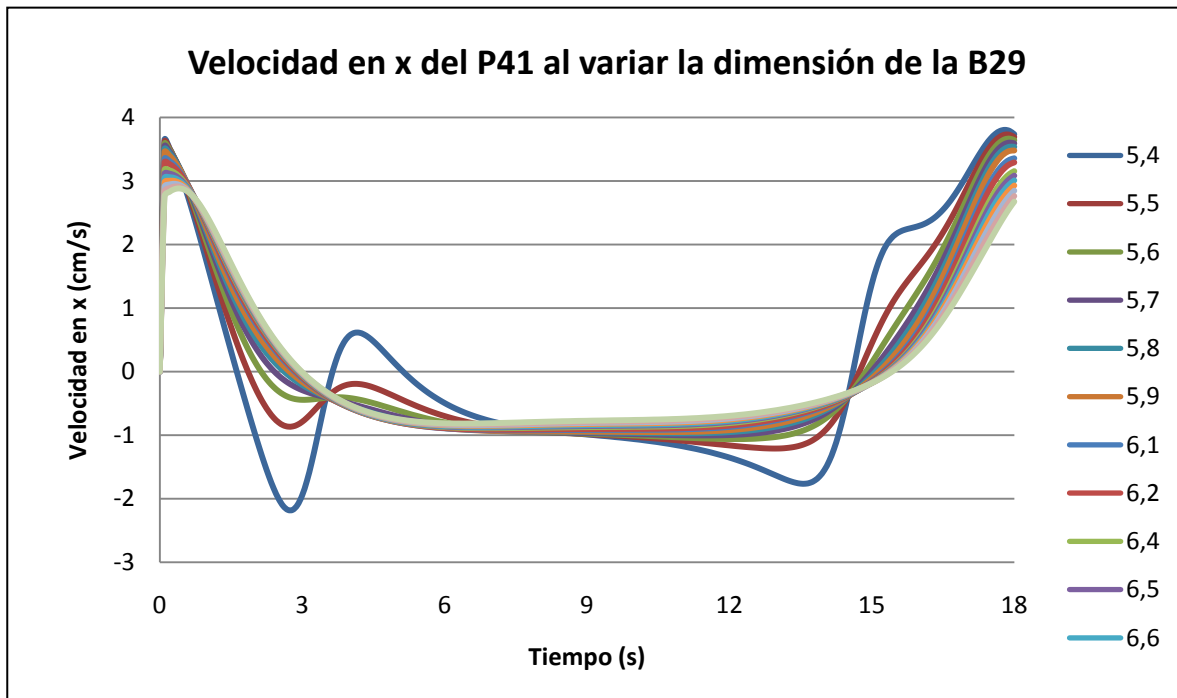
A mayor dimensión de las barras se obtiene un mayor valor de la posición en el eje de abscisas respecto al tiempo. Se toman como válidos los resultados obtenidos para unas dimensiones mayores a 5,6 cm, ya que a partir de ahí los resultados obtenidos no siguen la tendencia del resto e incluso se producen máximos más pronunciados con la barra de menor dimensión.

BARRA 29



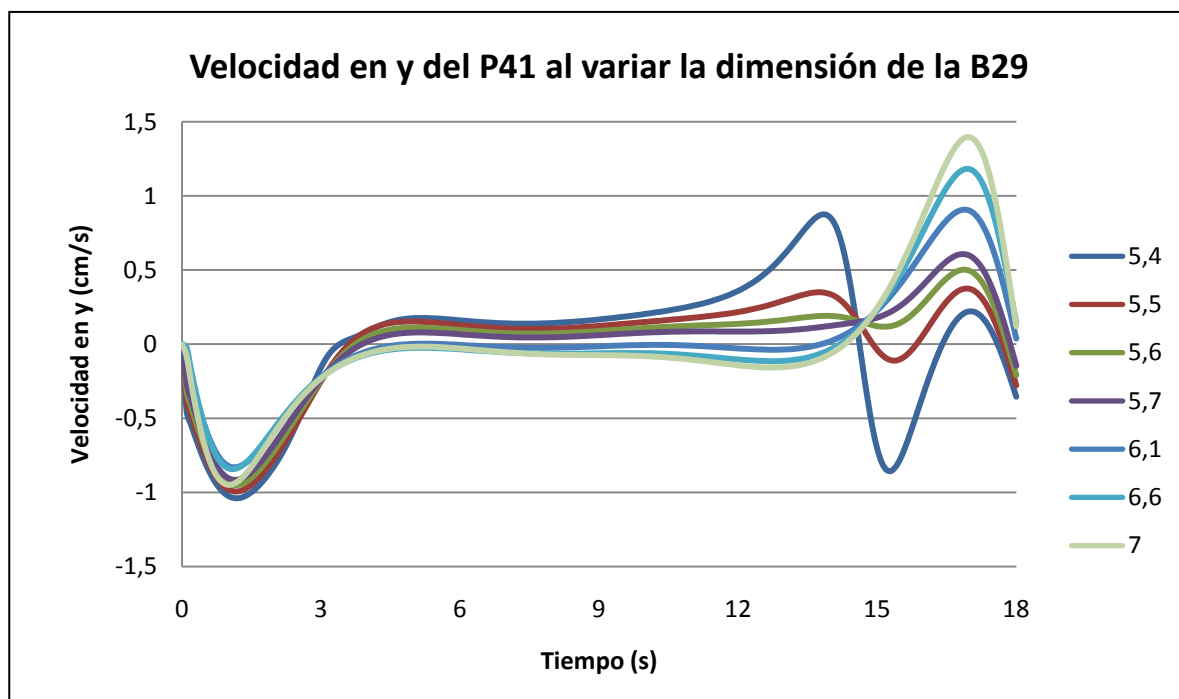
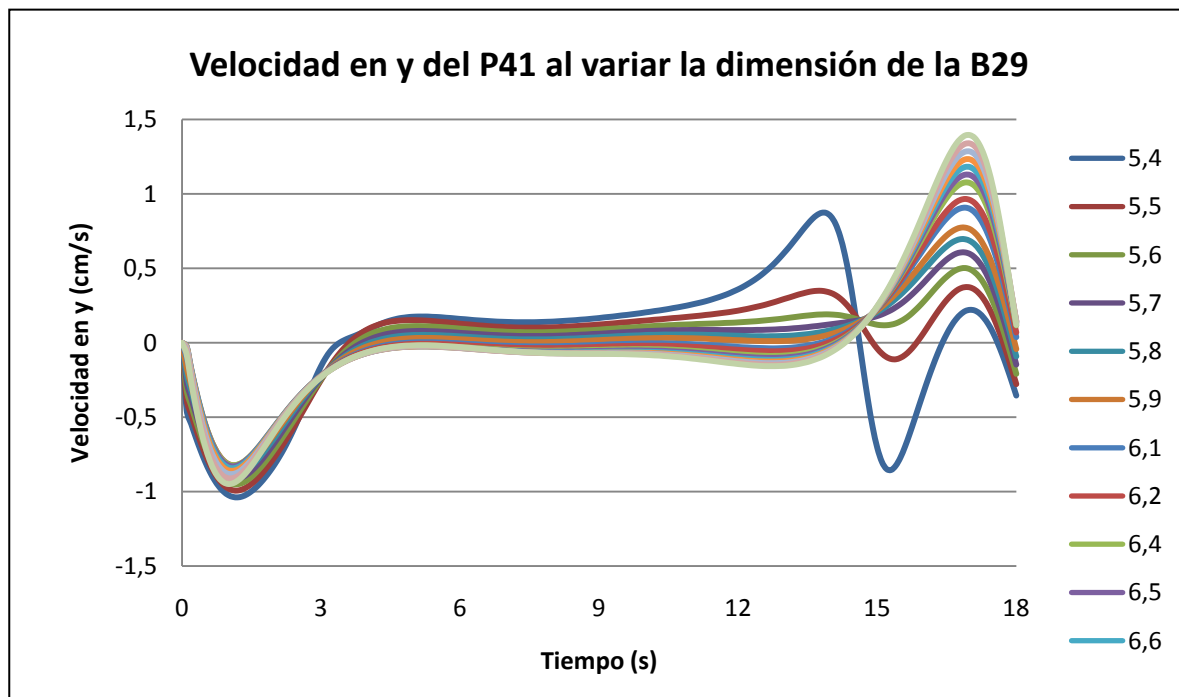
La posición en el eje de ordenadas frente al tiempo aumenta a medida que aumenta la dimensión de la barra a excepción de las barras de menor tamaño, ya que el comportamiento de estas en cuanto a la posición en el intervalo [10,17] es extraño.

BARRA 29



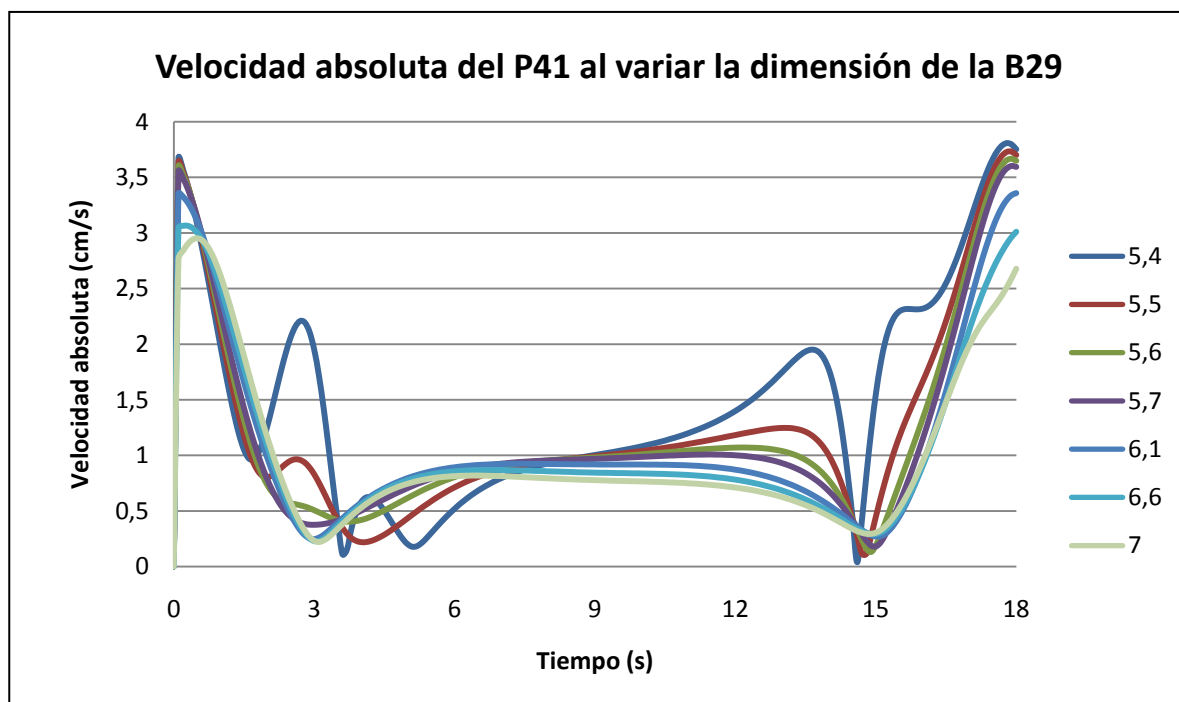
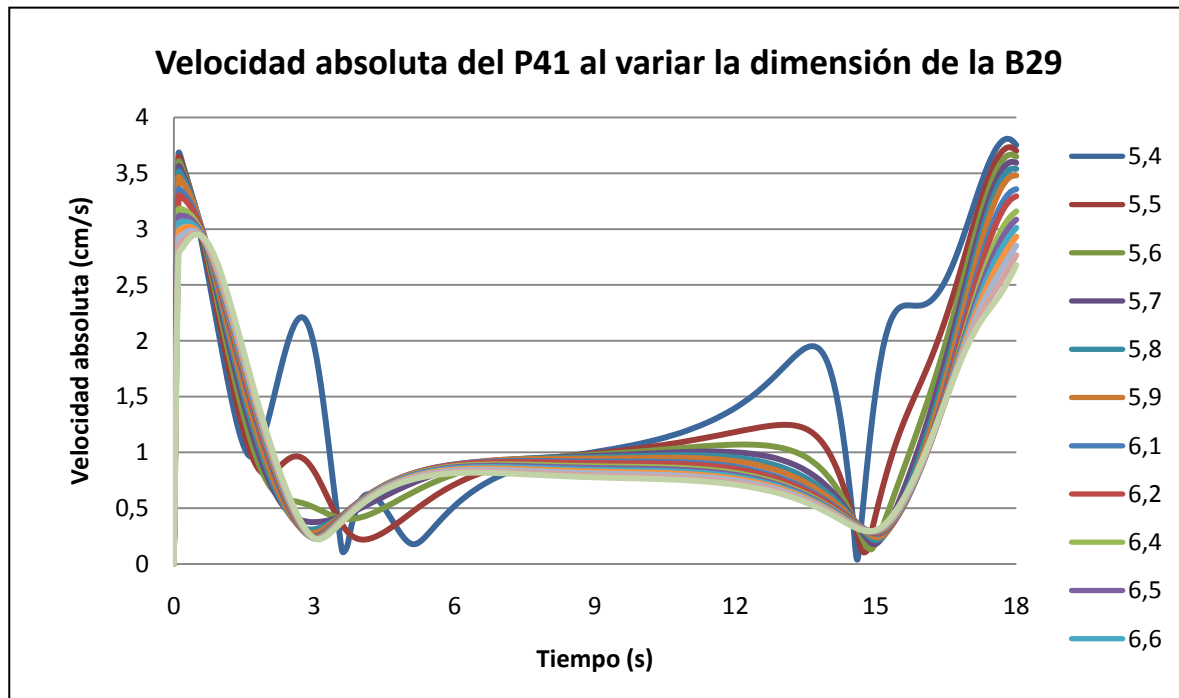
En esta gráfica, para los distintos tamaños de barra, se obtiene prácticamente la misma velocidad en x, excepto para la las barras de menor tamaño a 5,6 aproximadamente. En los instantes de tiempo de 3.5 y 14.5 segundos la velocidad es la misma independientemente del tamaño de la barra.

BARRA 29



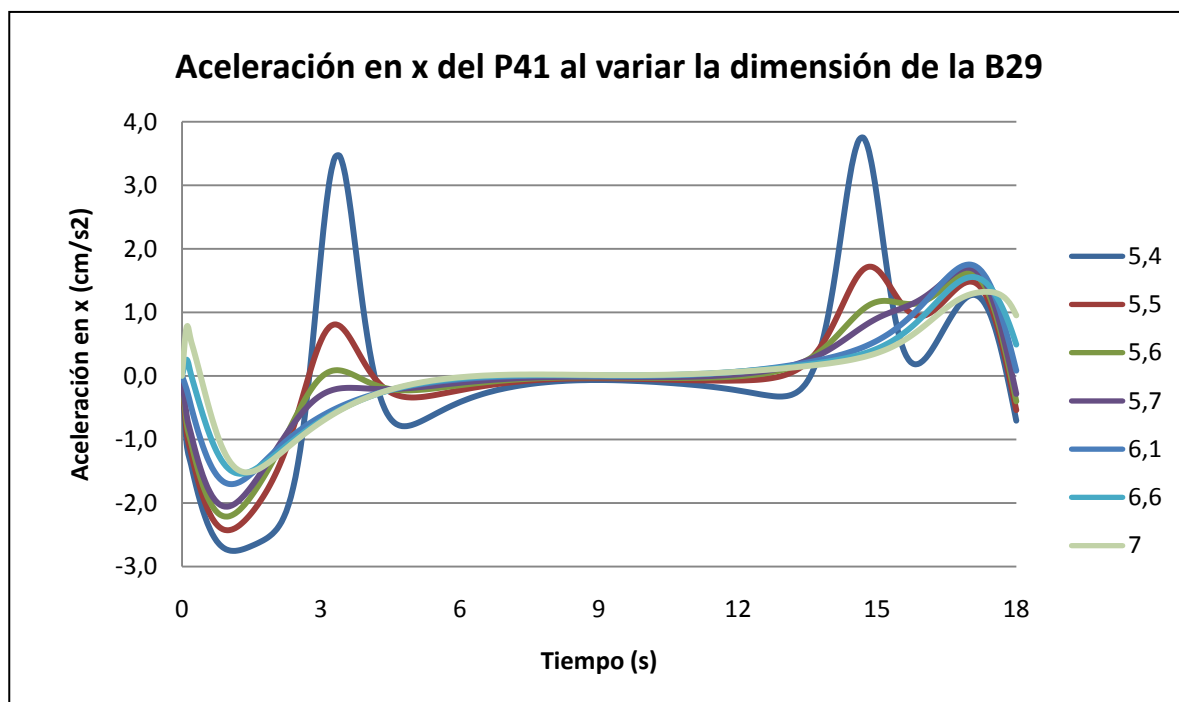
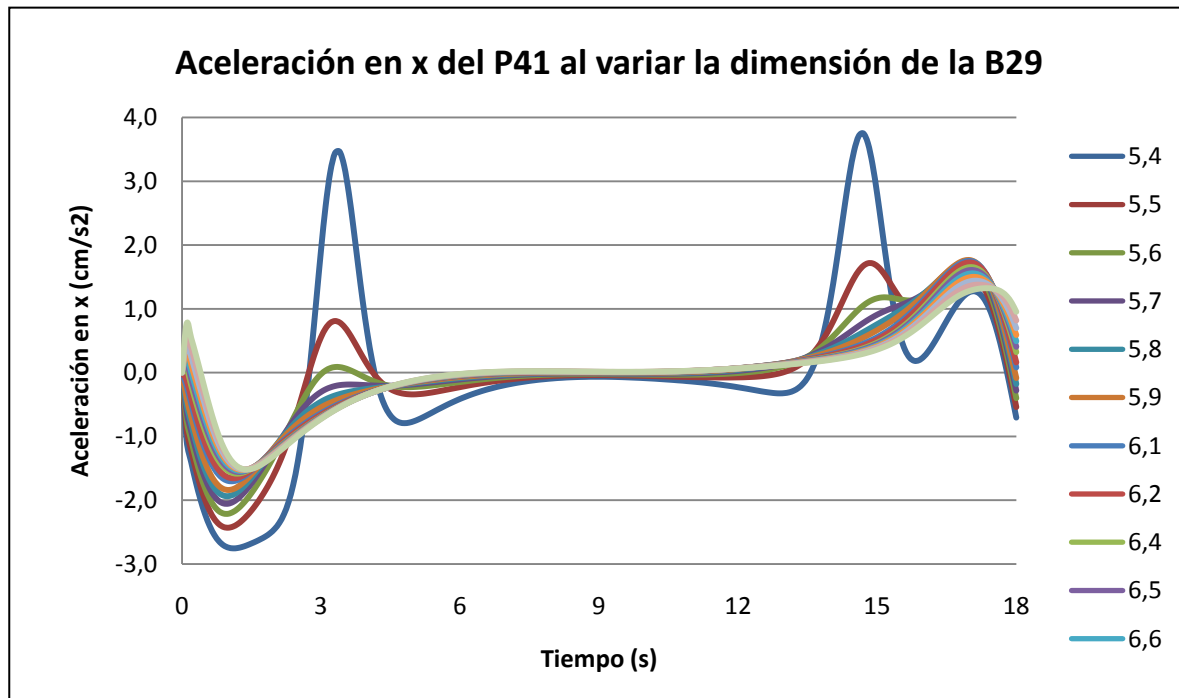
La velocidad para los distintos tamaños de barra hasta el instante 14,5 segundos es muy similar, salvo para las barras de menor tamaño a 5,6 cm. A partir de ahí, las velocidades sufren variaciones considerables. En los instantes de tiempo de 3 y 14.5 segundos la velocidad es la misma independientemente del tamaño de la barra.

BARRA 29



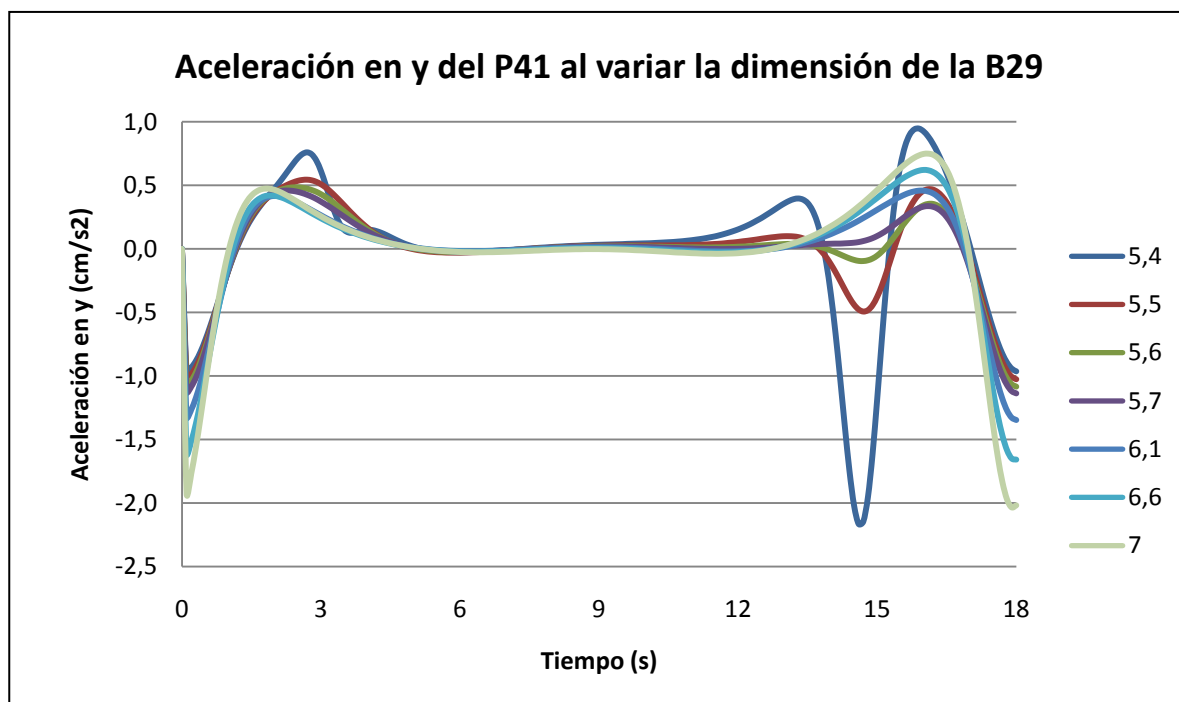
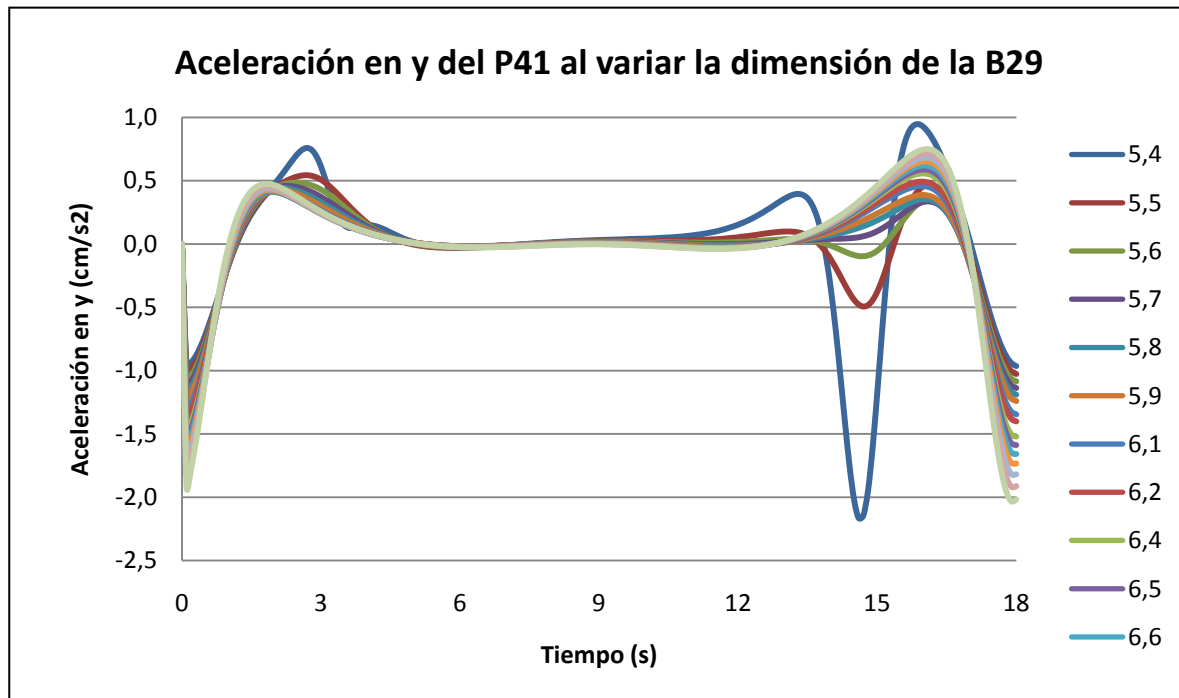
La velocidad absoluta obtenida resulta dispar para las distintas barras. Para barras menores a 5,6 cm las velocidades se comportan de una manera alocada llegando incluso a producirse algún pico, que es lo que le sucede a la barra de menor tamaño.

BARRA 29



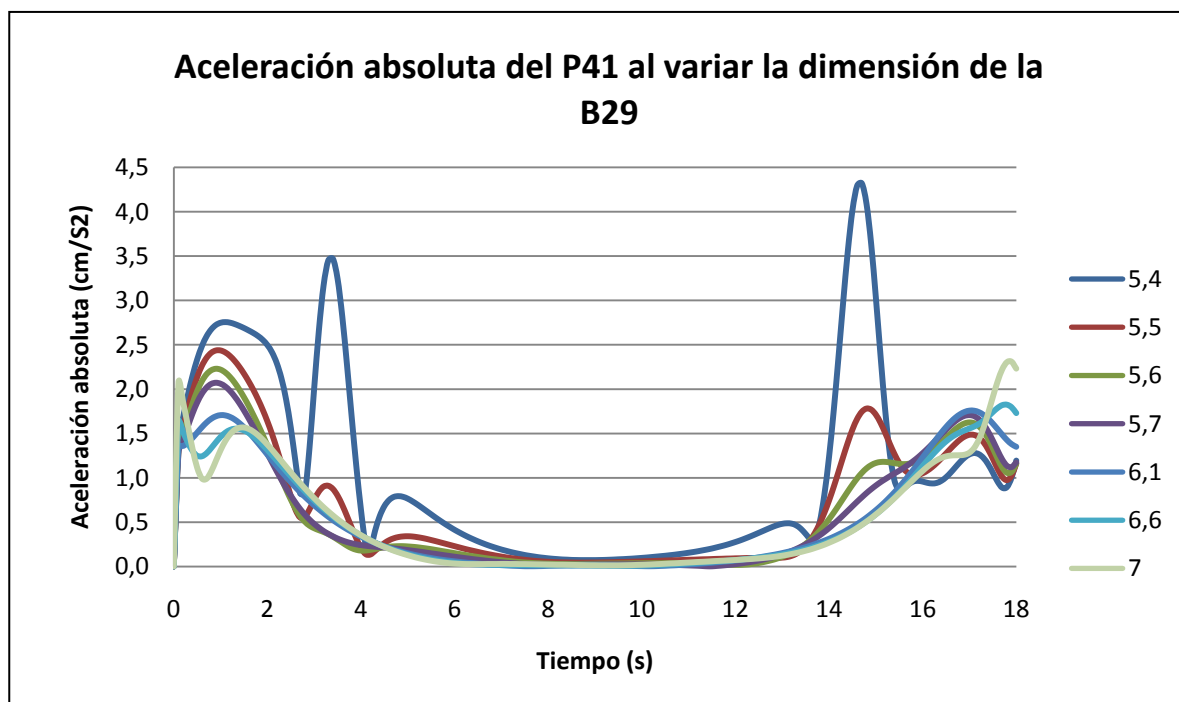
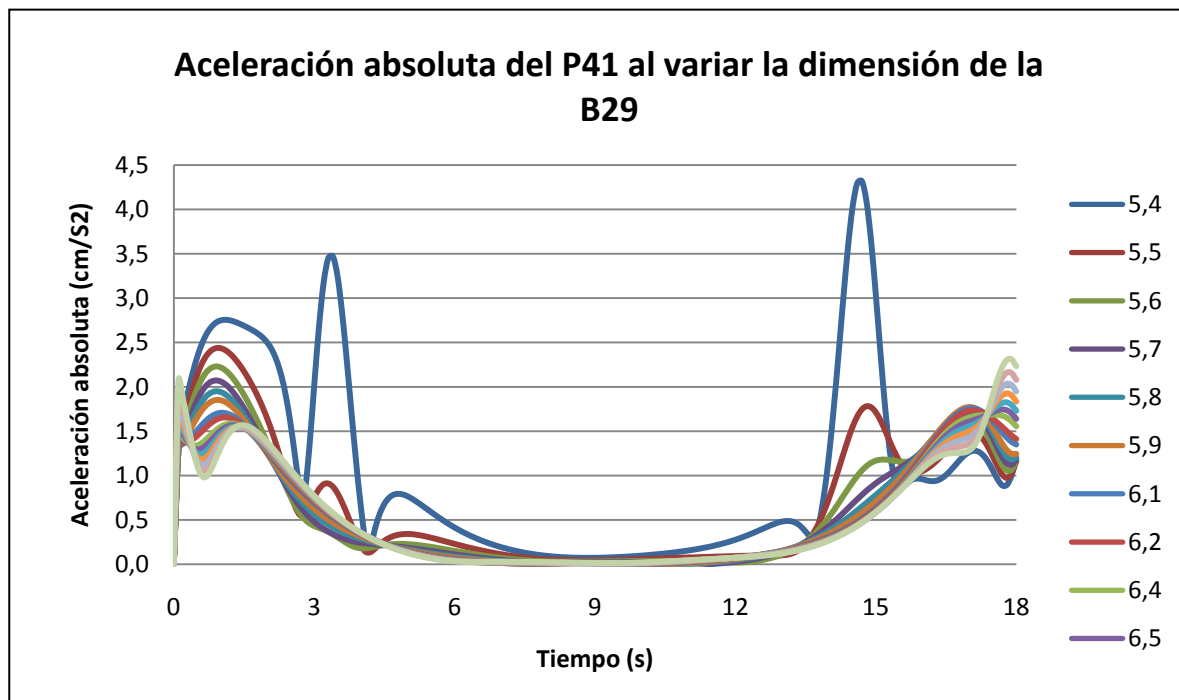
Las aceleraciones obtenidas son muy parecidas en el tiempo de estudio realizado. Al igual que en las gráficas anteriores, la aceleración para tamaños de barra inferiores a 5,6 cm reflejan unos resultados dispares.

BARRA 29



Para dimensiones de la barra inferiores a 5,6 cm las aceleraciones obtenidas son muy parecidas. Para dimensiones mayores, las aceleraciones sufren un comportamiento extraño, especialmente en la barra de menor tamaño, de 5,4 cm, llegando incluso a aparecer un máximo muy pronunciado en el instante 15 segundos.

BARRA 29



Para dimensiones de la barra inferiores a 5,7 cm las aceleraciones obtenidas son muy parecidas. Para dimensiones mayores, las aceleraciones sufren un comportamiento extraño, especialmente en la barra de menor tamaño, de 5,4 cm, dando máximos tanto en los instantes de 3 como de 15 segundos.